



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI DNOVÝCH PRVKŮ
NA DISIPACI ENERGIE NADKRITICKÉHO
PROUDU**

EFFICIENCY OF THE BOTTOM ELEMENTS ON THE SUPERCRITICAL FLOW ENERGY
DISSIPATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Knoflíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jakub Knoflíček
Název	Porovnání účinnosti dnových prvků na disipaci energie nadkritického proudu
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Čábelka, J.; Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice - výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Academia Praha, 1987
Kolář, V.; Patočka, C.; Bém, J.: Hydraulika. SNTL Praha, 1983
Mäsiar, E.; Kamenský, J.: Hydraulika pre stavebných inžierov (I). ALFA Bratislava, 1985
Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968
Šulc, J.; Žoužela, M.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice. Výzkumná zpráva, LVV ÚVS FAST VUT v Brně, 2013
Šulc, J.: Hydraulický modelový výzkum úprav pro snížení namáhání dna odpadní štol nových dnových výpustí VD Morávka. Výzkumná zpráva, ÚVV – FAST – VUT v Brně, 1998

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem práce je řešerše v oblasti používaných dnových prvků pro tlumení energie nadkritického proudu v korytech nebo štolách spodních výpustí vzdouvacích objektů vodních děl případně i stokách. Na hydraulickém modelu umístěném ve zkušebním žlabu obdélníkového průtočného průřezu budou simulovány proudové poměry při použití dnových příčných prahů a dnových rozrážečů, jejichž tvary navrhne po vyhodnocení dostupných publikovaných výsledků diplomant. Výsledky měření budou zpracovány, vyhodnoceny a jednotlivé způsoby tlumení budou následně vzájemně z hlediska účinnosti porovnány s klasickými způsoby tlumení (prohloubené dno, vzduť hladina dolní vody). Zpracované výsledky budou vyjádřeny ve formě údajů aplikovatelných pro použití v hydrotechnické praxi.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá porovnáním míry disipované kinetické energie nadkritického proudu při použití různých dnových prvků na základě modelového výzkumu. Absence údajů o účinnostech jednotlivých dnových prvků neumožňuje vzájemné porovnání různých úprav dna v dolních zdržích vzdouvacích staveb.

V rámci experimentálního výzkumu byly měřeny hloubkové poměry při různých variantách úpravy vývaru dnovými prvky.

Na základě modelových zkoušek jsou zhodnoceny a tabelárně seřazeny varianty podle efektivity tlumení kinetické energie vodního proudu. Výsledky práce mohou být použity pro efektivní a hospodárný návrh zejména dodatečných úprav vývarů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodní skok, vývar, modelový výzkum, dnový prvek, disipace, rozrážeč, práh

ABSTRACT

The thesis is dealing with comparing dissipation of the kinetic energy water flow using various bottom elements based on model research. There is missing information about efficiency of different kinds of bottom elements. This absence does not allow to compare different modification of the bottom of stilling basins.

Within experimental research were measured depths in different variants.

Based on the results of model tests are evaluated and tabulated sorted variants of the combat efficiency of the kinetic energy water flow. The results will be used for the efficient and economic design of additional alterations of stilling basins.

KEYWORDS

Hydraulic jump, stilling basin, model research, bottom element, dissipation, baffle, sill

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Jakub Knoflíček *Porovnání účinnosti dnových prvků na disipaci energie nadkritického proudu*. Brno, 2017. 68 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2017

Bc. Jakub Knoflíček

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za ochotu a především za trpělivost, kterou opět projevil při vedení mé práce.

OBSAH

1	ÚVOD DO HYDRAULICKÉ PROBLEMATIKY	10
1.1	Proudění s volnou hladinou.....	10
1.2	Vodní skok	12
1.2.1	Druhy vodního skoku.....	12
1.2.2	Polohy vodního skoku	14
1.2.3	Parametry vodního skoku	15
1.3	Provzdušnění vodního paprsku	16
2	DNOVÉ PRVKY PRO TLUMENÍ ENERGIE NADKRITICKÉHO PROUDU	17
2.1	Rozrážeče.....	17
2.1.1	Rozrážeče na konci přelivné plochy	17
2.1.2	Rozrážeče na konci odrazového můstku	17
2.1.3	Vývarové rozrážeče	17
2.1.4	Prahové rozrážeče	22
2.2	Prahy na konci vývaru.....	22
2.2.1	Prahy s šikmými čely	22
2.2.2	Prahy se svislými čely.....	22
2.2.3	Ozubené prahy	22
2.3	Ponořené odrazové můstky	24
2.4	Použití lyžařských můstků	25
3	ÚČEL PRÁCE	26
4	MODEL A MĚRNÁ TRAT	27
4.1	Model	27

4.1.1	Zkoušené varianty	28
4.2	Měrná trať	37
4.2.1	Měřicí technika	39
4.3	Modelová podobnost	41
5	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY	42
5.1	Postup zkoušek	42
5.1.1	Úpravy modelu	42
5.1.2	Vlastní měření	45
5.2	Zjištěné charakteristiky	46
5.2.1	Měřené	46
5.2.2	Odvozené	47
6	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK	49
6.1	Účinnost tlumení kinetické energie	49
6.2	Potřebná hloubka dolní vody	58
6.3	Délka vodního skoku	58
7	ZÁVĚR	61
8	LITERATURA A POUŽITÉ PODKLADY	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	66
	SEZNAM PŘÍLOH	68

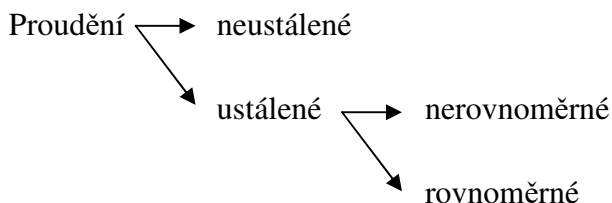
1 ÚVOD DO HYDRAULICKÉ PROBLEMATIKY

Otázka tlumení energie vodního proudu má v hydrotechnické praxi široké uplatnění. Tato problematika úzce souvisí s bezpečností každého vodního díla. Proud vody za spodní výpustí, přelivem nebo skluzem má i u nízkých přehrad tak velkou kinetickou energii, že by bez jejího tlumení mohl ohrožovat stabilitu koryta pod vodním dílem nebo dokonce i bezpečnost přehrady. Návrh tlumicího zařízení je proto součástí každého návrhu jezu či přehrady [1].

1.1 PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU

Proudění kapalin s volnou hladinou můžeme rozdělit podle proměnlivosti v čase na proudění neustálené, kde se průtočná plocha, průřezová rychlost a průtok v čase mění, a na proudění ustálené, kde jsou tyto veličiny v čase konstantní.

Ustálené proudění je možno dělit na rovnoměrné a nerovnoměrné. Při splnění požadavku na neměnný sklon dna, neměnnou drsnost povrchu a tvar průtočného průřezu se jedná o proudění rovnoměrné. Pokud tyto podmínky splněny nejsou, jedná se o proudění nerovnoměrné.



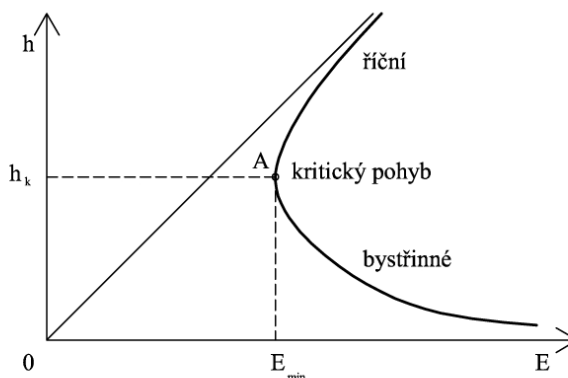
Při konstantním průtoku Q v libovolném příčném řezu koryta nastávají různé hloubky vody. Ke každé takovéto hloubce lze stanovit měrnou energii průřezu podle:

$$E = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2gS^3} \quad (1.1)$$

kde h maximální hloubka v korytě,
 α Coriolisovo kritérium,
 v průřezová rychlost,
 g tíhové zrychlení,
 Q průtok,
 S průřezová plocha.

Pozn.: Coriolisovo kritérium vyjadřuje poměr skutečné kinetické energetické výšky k této výšce vyjádřené z průřezové rychlosti [2].

Měrná energie průřezu (někdy označovaná jako energetická výška průřezu), „je tedy množství energie, které přísluší jednotce tíhy průtoku určitým průřezem a je vztaženo k úrovni nejnižšího bodu tohoto profilu [2]“. Závislost hloubky h na měrné energii E při konstantním průtoku $Q = \text{konst.}$ v prismatickém korytě je znázorněna na obr. 1.



Obr. 1 Závislost hloubky na energii proudu

Proudění označujeme při podmínce $h > h_k$ jako říční proudění (podkritické)

$h = h_k$ jako kritické proudění

$h < h_k$ jako bystřinné proudění (nadkritické)

Z obrázku 1 vyplývá, že při hloubce $h \rightarrow 0$, bude i $S \rightarrow 0$, tedy $E \rightarrow \infty$. Proto se ve spodní části grafu energetická výška E asymptoticky blíží vodorovné ose. Naopak při $h \rightarrow \infty$, bude i $S \rightarrow \infty$. Takže funkce uvedená v rovnici (1.1) nabude tvaru $E = h$, přičemž opět roste $E \rightarrow \infty$. Druhou asymptotou tedy bude osa prvního kvadrantu souřadnicového systému. Mezi těmito asymptotami vytvoří křivka vrchol A se zvláštním hydraulickým významem. Vrcholem křivky A je určen kritický pohyb. Oblasti bystřinného a říčního proudění jsou odděleny vodorovnou přímkou procházející právě bodem A. V režimu kritického proudění je průtok Q převáděn s vynaložením nejmenšího množství energie [2].

Kritická rychlost v_k je průřezová rychlost při kritickém pohybu.

Kritický sklon i_k je sklon, při němž je průtok Q převeden rovnoměrným prouděním o hloubce rovné hloubce h_k .

1.2 VODNÍ SKOK

*„Vodní skok je hydraulický jev, který vzniká při **přechodu z pohybu bystřínného do říčního**; vyznačuje se náhlým zvětšením hloubky proudu a přechodem od velké rychlosti k malé [2].“*

Jinými slovy jde o jev, který vzniká při **přechodu z nadkritického proudění do podkritického proudění**.

Jedná se o nespojitý a bouřlivý hydraulický děj. Pohybová (kinetická) energie proudu vody se během něj přemění na energii polohovou (potenciální). Je doprovázen značnou ztrátou celkové energie. V důsledku intenzivního víření vody se část energie přemění v teplo. Vlivem strhávání vzduchu je další část energie přeměněna na zvukovou.

Přechod z říčního do bystřínného proudění probíhá spojitě bez žádného jevu podobnému vodnímu skoku. Tento přechod vzniká při změnách sklonu či průřezu.

1.2.1 Druhy vodního skoku

Podle polohy tranzitního proudu rozlišujeme vodní skok:

s povrchovým režimem (tranzitní proud je soustředěn při hladině) označován jako **povrchový vodní skok** [1],

s dnovým režimem (tranzitní proud je soustředěn při dně) se dělí na **prostý vodní skok** a **vlnovitý vodní skok** (obr. 2).

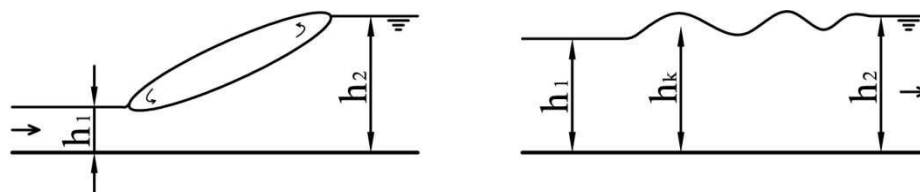
Dělení vodního skoku s dnovým režimem se řídí podle Froudova kritéria, které vychází z první vzájemné hloubky h_1 :

$$Fr = \frac{\alpha v_1^2}{g h_1}, \quad (1.2)$$

kde Fr.....Froudovo kritérium,
 α Coriolisovo kritérium,
 v_1 rychlost proudu vody v profilu počátku vodního skoku,
 g konstanta tíhového zrychlení,
 h_1 hloubka vody v profilu počátku vodního skoku.

Prostý vodní skok se zřetelně rozlišitelným provzdušněným vodním válcem na povrchu, který nastává při $Fr_1 > 3$; $h_2 > 1,8 h_k$ (hloubka h_2 je druhá vzájemná hloubka vodního skoku viz obr. 2

Vlnovitý vodní skok tvořený řadou zmenšujících se vln bez vodního válce. Tvoří se při malé výšce vodního skoku, zejména při $h_2 < 1,3 h_k$; $Fr_1 < 3$ (hloubky h_2 a h_k jsou znázorněny na obr. 2 [3].



Obr. 2 Vodní skok s dnovým režimem – prostý a vlnovitý

Pozn.: Podobnou funkci jako Froudovo kritérium plní rovněž v literatuře méně používaná veličina nazývaná jako *index bystřinnosti* M:

$$M = \sqrt{Fr}, \quad (1.3)$$

kde M.....index bystřinnosti,
Fr.....Froudovo kritérium.

1.2.2 Polohy vodního skoku

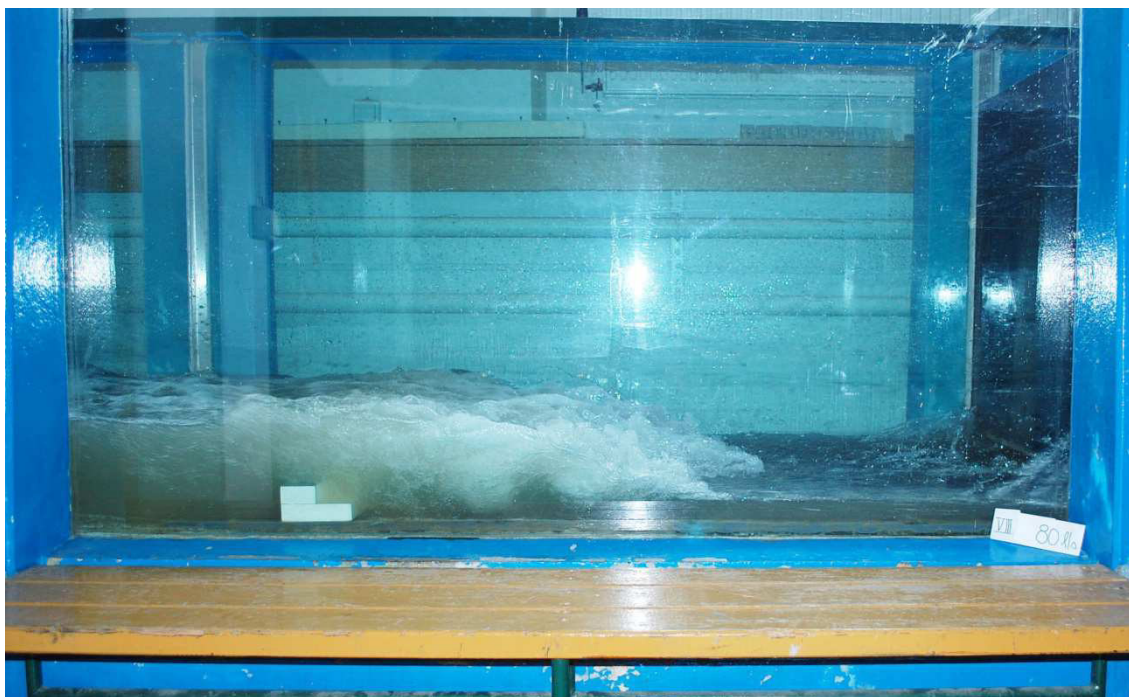
Dalším rozlišovacím znakem vodního skoku je jeho poloha vzhledem k vzdušnému líci spodní stavby. Rozeznáváme tři polohy vodního skoku:

Vodní skok **oddálený** $h_d / h_2 < 1$,

kde h_dhloubka dolní vody, tj. přirozeně se vyskytující hloubka proudu pod vodním dílem

h_2druhá vzájemná hloubka vodního skoku viz obr. 2.

Při úrovni hladiny dolní vody (v odpadním korytě) pod úrovní druhé vzájemné hloubky vodního skoku dochází k „odsunutí“ vodního skoku dále po toku. V oblasti mezi vzdušným lícem vodní stavby a začátkem oddáleného vodního skoku je tedy zachováno bystřinné proudění s vysokými rychlostmi (obr. 3). V důsledku vysokých rychlostí se po délce propagují ztráty, které mají za následek snížení energetické výšky a přírůstek hloubky proudící vody. Až v okamžiku, kdy hloubka dosáhne hodnoty první vzájemné hloubky h_1 , která přísluší druhé vzájemné hloubce $h_2 = h_d$, jsou teprve splněny podmínky pro vznik vodního skoku. Tato situace může nastat i několik set metrů od jezu [3]. Pro návrh tlumicích zařízení je tato situace nepřijatelná, protože by vyžadovala velmi rozsáhlé a neekonomické opevňování dna a břehů.



Obr. 3 Varianta V-8 při $80 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, oddálený vodní skok

Vodní skok přilehlý

$$h_d / h_2 = 1$$

Jsou-li u paty skluzu (jezu) vytvořeny zákonité podmínky pro vznik vodního skoku, vznikne vodní skok přilehlý. Tato situace je nahodilá a výjimečná.

Vodní skok vzdutý

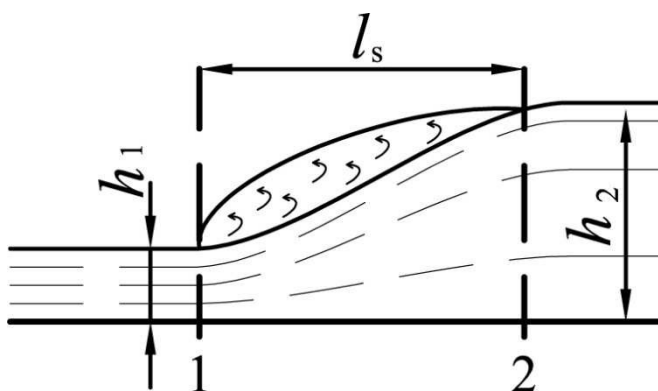
$$h_d / h_2 > 1$$

Při vyšší úrovni hladiny dolní vody než odpovídá hloubce h_2 má vodní skok tendenci se přemísťovat (v analogii s oddáleným vodním skokem) proti směru proudění. Tomu ovšem brání vzdouvací stavba. Vodní skok tedy zůstává stabilizován u paty tohoto tělesa. Dolní voda v tomto případě vodní skok zalévá [3]. Jedná se o stabilní polohu vodního skoku. Mírně vzdutá poloha vodního skoku je na bezpečnostních objektech doporučována pro všechny průtoky až do průtoku návrhového pro předmětný vývar.

1.2.3 Parametry vodního skoku

Vodní skok (popsaný v kapitole 1.2) lze popisovat následujícími parametry:

- **První vzájemná hloubka h_1** je hloubka proudu vody v profilu bezprostředně před vodním skokem, tj. v oblasti bystrinného proudění (h_1 na obr. 4).
- **Druhá vzájemná hloubka h_2** je hloubka proudu vody v profilu těsně za vodním skokem, tj. v oblasti říčního proudění (h_2 na obr. 4).
- **Délka vodního skoku l_s** je vzdálenost profilů zmíněných vzájemných hloubek. (l_s na obr. 4).
- **Výškou vodního skoku h_s** rozumíme rozdíl vzájemných hloubek. $h_s = h_2 - h_1$



Obr. 4 Schéma parametrů vodního skoku

1.3 PROVZDUŠNĚNÍ VODNÍHO PAPRSKU

Některé prostředky pro tlumení energie proudu využívají jev, kdy vzduchem letící vodní paprsek díky své velké rychlosti se intenzivně provzdušňuje a v místě dopadu nepůsobí už takové škody. Spolu se správně zvoleným místem dopadu, případně těžkým opevněním dna se jedná o účinný nástroj tlumení energie.

Nástrojem pro využití tohoto jevu bývají takzvané lyžařské můstky nejčastěji používané na koncích vzdušního líce bezpečnostních objektů přehrad. Jejich primárním účelem je „odhození“ paprsku do dostatečné vzdálenosti od vzdušní paty přehrad. Intenzivním provzdušněním paprsku ze všech stran se značně sníží namáhání v místě dopadu.

2 DNOVÉ PRVKY PRO TLUMENÍ ENERGIE NADKRITICKÉHO PROUDU

Existují konstrukce, které pomáhají zefektivnit tlumení kinetické energie vodního proudu a tím přispívají k zmenšování vývaru a k snižování nároků na odolnost obtékaného povrchu. Některé se budují přímo na dně vývaru, jiné na skluzech a některé v prostoru navázání vývaru na odpadní koryto. Souhrnně jsou označovány jako dnové prvky a patří mezi ně následující objekty.

2.1 ROZRÁŽEČE

Rozrážeče jsou „*vhodně rozmístěná vyčnívající tělesa*“[4], jejichž účelem je účinnější tlumení kinetické energie vodního proudu.

2.1.1 Rozrážeče na konci přelivné plochy

Rozrážeče umístěné na přepadové ploše například jezového tělesa nebo bezpečnostního objektu rozdělují kompaktní paprsek na několik proudů, zvětšují jeho povrch a napomáhají jeho lepšímu provzdušnění. Tyto jevy zvyšují procento zmařené energie ještě před vstupem paprsků do vývaru a tím dochází ke zmenšení potřebných rozměrů vývarů.[4]

2.1.2 Rozrážeče na konci odrazového můstku

Kvalitativně shodné principy platí pro rozrážeče umístěné na konci odrazového můstku. I zde zvětšují účinnou tloušťku paprsku a napomáhají jeho lepšímu provzdušnění. Mohou také zapříčiňovat vzájemné srážení několika paprsků.

Rozrážeče na přepadové ploše jezové konstrukce i rozrážeče na konci odrazového můstku „*se navrhují rovnoběžné se směrem proudění a symetrické k ose vývaru*“[4]. V případě divergentního vývaru je vhodné jejich vějířovité půdorysné uspořádání.

2.1.3 Vývarové rozrážeče

Použití vývarových rozrážečů je vhodné v případech, kdy je zapotřebí tlumit energii proudu s vysokým specifickým průtokem q . Vysoký specifický průtok bývá na výtoku ze spodních výpustí vodních děl a na konci úzkých skluzů. Rozrážeče zde napomáhají rozšíření úzkého proudu a tím snižují specifický průtok.

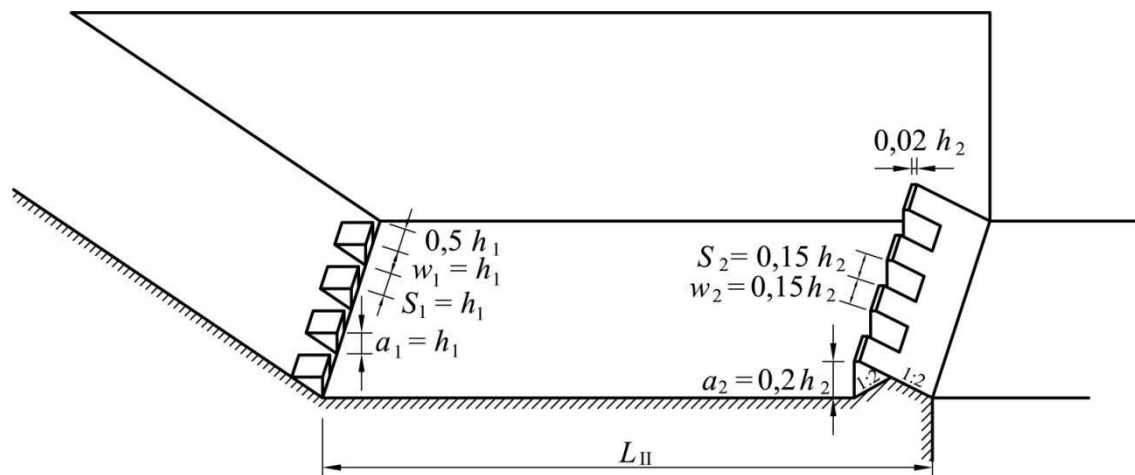


Obr. 5 Dvojice mohutných dnových rozrážečů (VD Vranov, Dyje)[5]

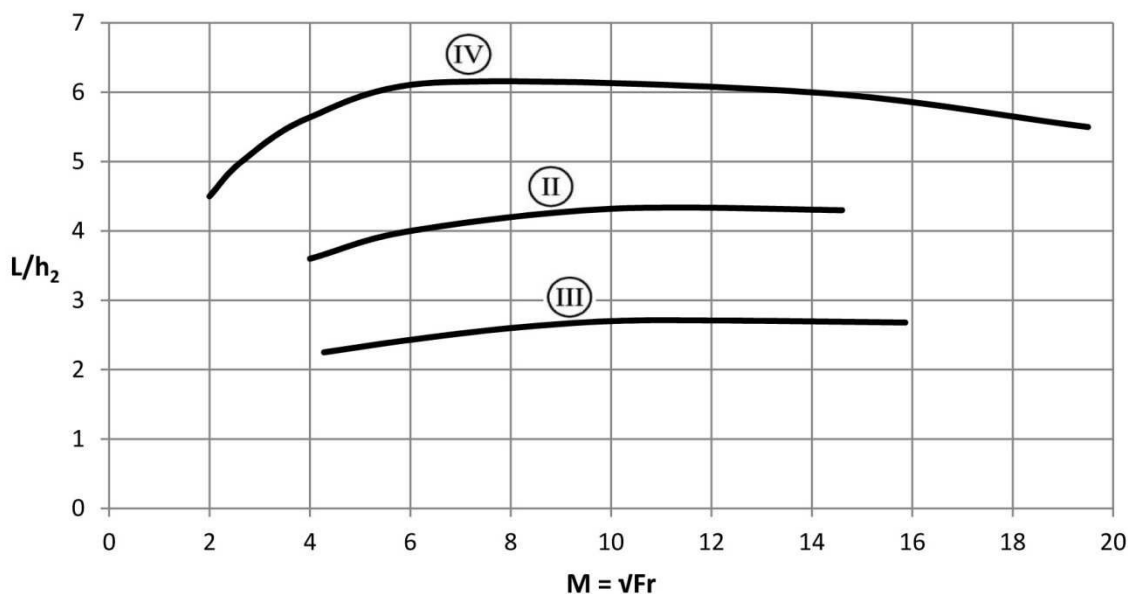
Vývarové rozrážeče jsou v literatuře nejčastěji uváděny jako součást typových vývarů s rozrážeči nazvaných po autorovi Peterkův vývar II, Peterkův vývar III a Peterkův vývar IV. Tyto vývary je možno použít pro předběžný návrh nebo pro srovnávání různých alternativ. Účinnost výsledného návrhu je vždy vhodné ověřit v rámci modelového výzkumu.

Peterkův vývar II předpokládá umístění rozrážečů již na konci přelivné plochy a vývar je zakončený Rehbockovým ozubeným prahem. Je vhodný pro index bystřinnosti $M = (4,5 \div 15)$ [1], což odpovídá $Fr = (20 \div 225)$. Toto rozmezí charakterizuje poměry proudu pod vzdouvacími objekty do výšky 60 m a specifickým průtokům do $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na jeden běžný metr šířky vývaru [6]. Verifikačními zkouškami bylo prokázáno, že změna sklonu přelivné plochy nemá výrazný vliv na funkci vývaru [6]. Délku vývaru lze pro známou hodnotu indexu bystřinnosti M (potažmo Froudova kritéria Fr) odečíst z grafu

na obrázku 7. Na grafu je pro porovnání vykreslen i poměr L/y_2 prostého vývaru bez rozrážečů. Dno Peterkova vývaru II je vhodné výškově umístit tak, aby míra vzdutí vodního skoku byla $\sigma = 1,05$ (aby hloubka vody v korytě za vývarem byla 1,05 násobkem druhé vzájemné hloubky vodního skoku, $h_d = 1,05h_2$) [1]. Vhodné navázání přelivné plochy na vývar je kružnice o poloměru $R = 4h_1$ [6].



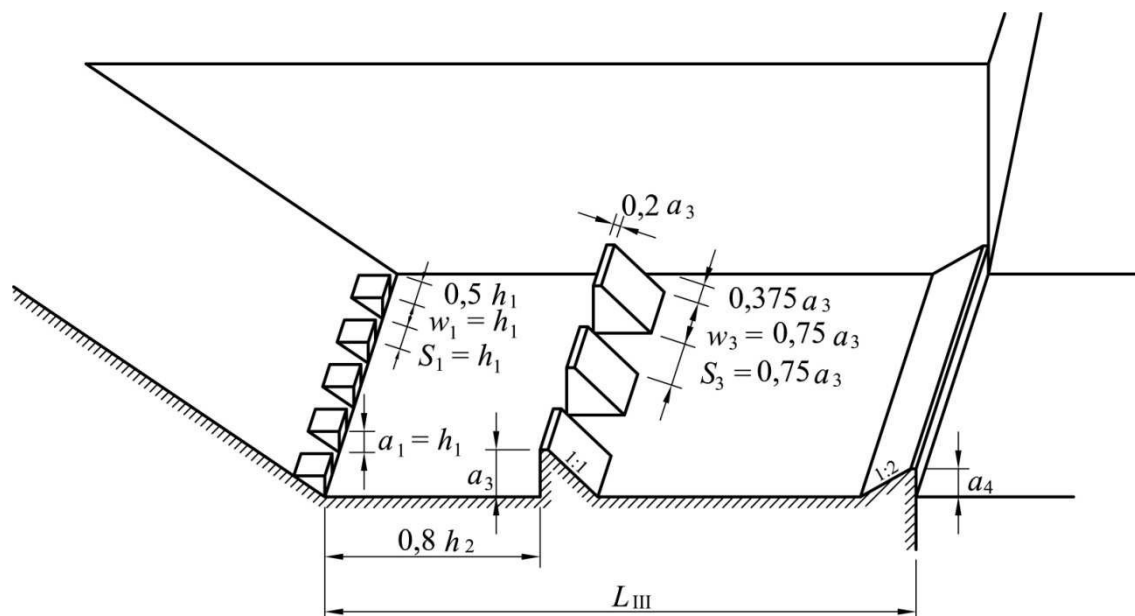
Obr. 6 Schéma Peterkova vývaru typu II s doporučenými rozměry



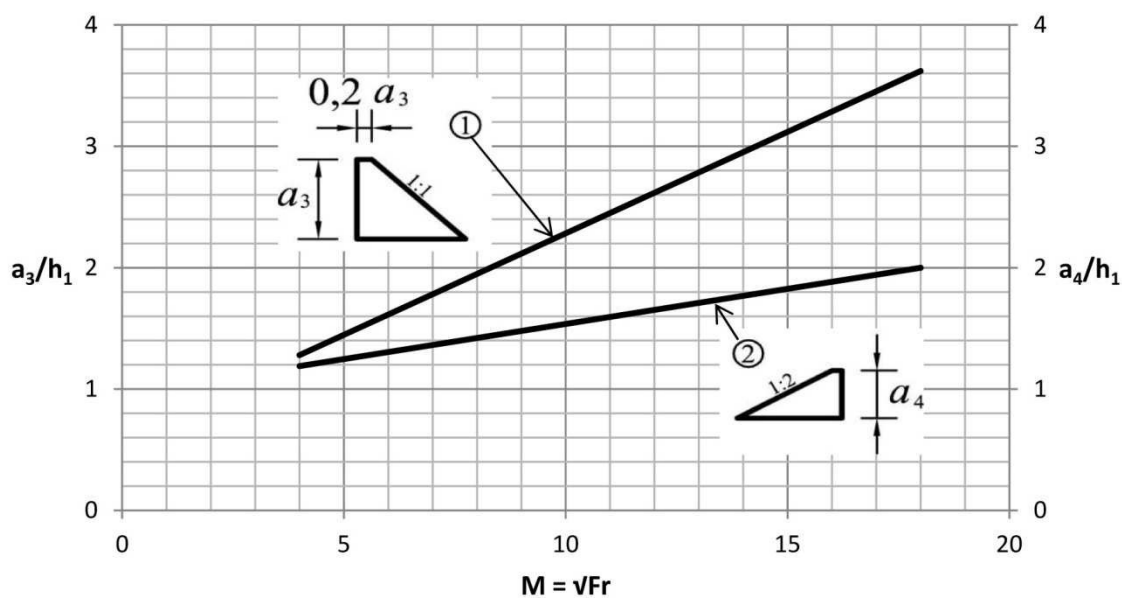
Obr. 7 Graf pro určení délky Peterkových vývarů typu II, III a IV

Peterkův vývar III byl navržen pro menší průtoky [1], zejména pro úzké přelivy a spodní výpusti [6]. Tento vývar s rozrážeči na konci přelivné plochy disponuje také mohutnými dnovými rozrážeči uprostřed a končí prizmatickým prahem. Z grafu na obrázku 7 vyplývá, že délka klasického vývaru (shodná s délkou Peterkova vývaru IV) je v porovnání s

délkou Peterkova vývaru typu II přibližně dvojnásobná. Výška rozrážečů a výška závěrečného prahu je patrná z grafu na obrázku 9. Výše uvedené informace platí pro specifické průtoky do $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na jeden běžný metr šířky vývaru a do rychlostí vodního proudu $v = (15 \div 18) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [6]. U vyšších rychlostí je třeba vhodně upravit rozrážeče proti působení kavitace [6].

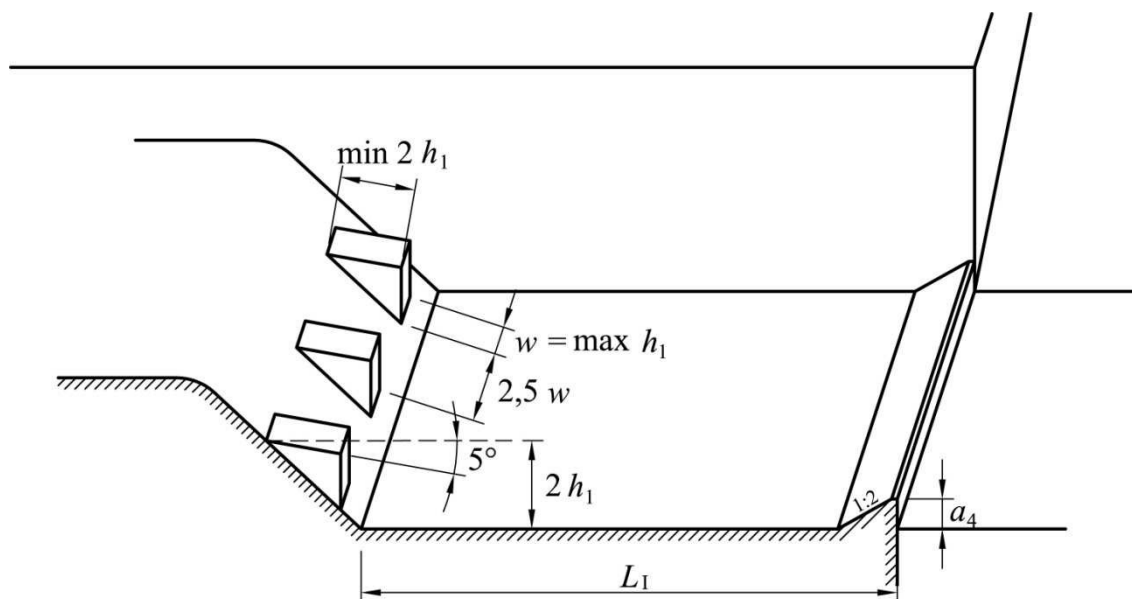


Obr. 8 Schéma Peterkova vývaru typu III s doporučenými rozměry



Obr. 9 Výška rozrážečů (1) a závěrečného prahu (2) Peterkova vývaru typu III

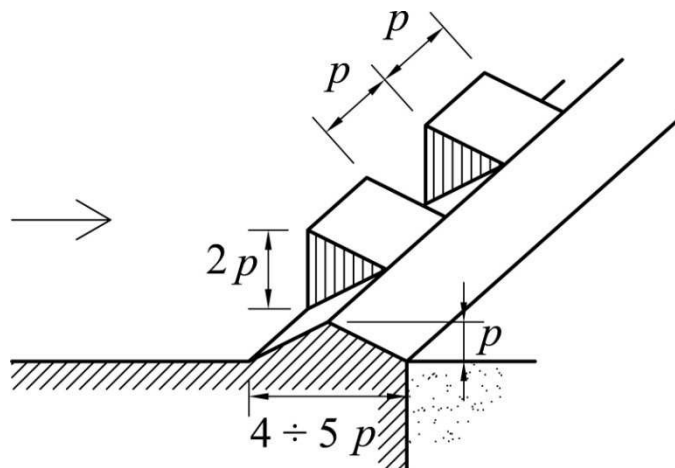
Peterkův vývar IV je vhodný pro bezpečnostní objekty menších přehrad, jezy do výšky 15 m a stupně v kanálech, kde lze proudění charakterizovat indexem bystřinnosti $M = (2,5 \div 4,5)$, tedy $Fr = (6 \div 20)$. Vodní proud s takto malými hodnotami Froudova kritéria v klasických vývarech osciluje ode dna směrem nahoru, což vyvolává obtížně tlumitelnou postupnou vlnu. Konstrukce vývaru je znázorněna na obrázku 10, kde $w = (0,75h_1 \div h_1)$. Délka vývaru jako L_1 se stanoví z diagramu na obrázku 7. Výška závěrečného prahu se stanoví stejně jako u vývaru typu III.



Obr. 10 Schéma Peterkova vývaru typu IV s doporučenými rozměry

2.1.4 Prahové rozrážeče

Umístěním jedné, dvou nebo více řad rozrážečů na závěrečný práh vývaru vzniká tzv. *ozubený práh* (viz kapitola 2.2.3).



Obr. 11 Rehbockův ozubený práh s doporučenými rozměry

2.2 PRAHY NA KONCI VÝVARU

2.2.1 Prahové s šikmými čely

Běžným způsobem zakončení zahloubeného vývaru je šikmo stoupající závěrečný práh.

2.2.2 Prahové se svislými čely

Prahové se svislým čelem umístěné na konci vývaru můžeme zvolit například v případě, že chceme zkrátit vývar. Takové opatření spočívá v nahrazení šikmo stoupajícího zakončení vývaru stupněm (stupni) se svislými čelními stěnami. Takovéto řešení značně zvyšuje míru disipované energie oproti běžnému zakončení vývaru šikmým čelem [7]. Výhodou takového přidání příčných závěrečných prahů je zejména vhodnost použití při rekonstrukcích např. vývarů bezpečnostních objektů přehrad se zmenšenými nároky na stavební práce [8].

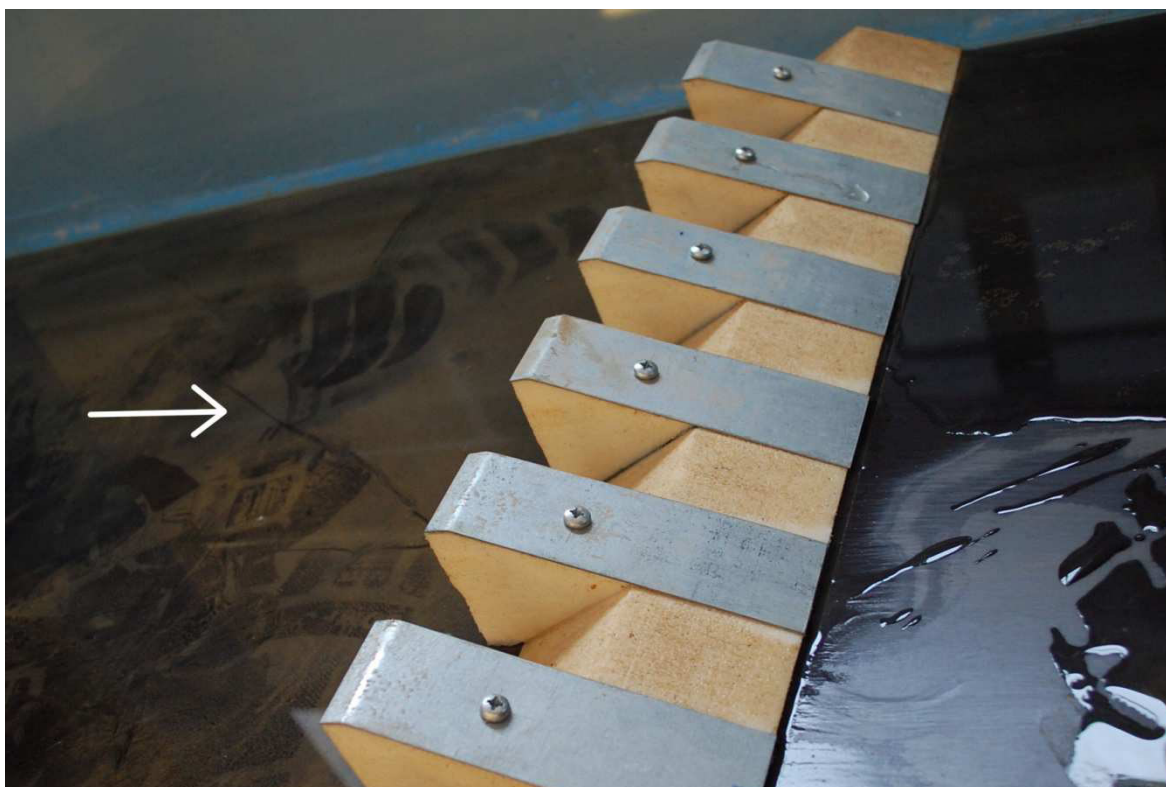
2.2.3 Ozubené prahy

Ozubené prahy bývají použity jako prvek stabilizující vodní skok v prostoru vývaru. Vodní skok ve vývaru zůstane, „i když míra jeho vzdušnosti σ mírně klesne pod hodnotu 1,0“ [4]. I ozubené prahy mají vliv na zkrácení potřebné délky vývaru.

Přidanou hodnotou ozubených prahů je fakt, že je díky nim část proudu za koncem vývaru nasměrována směrem vzhůru, což těsně za prahem zvýší míru tranzitního proudu při hladině. To má za následek zvětšení rozsahu plochého proudového válce s proudem u dna. Proud při dně svým zpětným pohybem přisouvá materiál k prahu vývaru.

Rehbockovy rozrážeče – Rehbockův ozubený práh

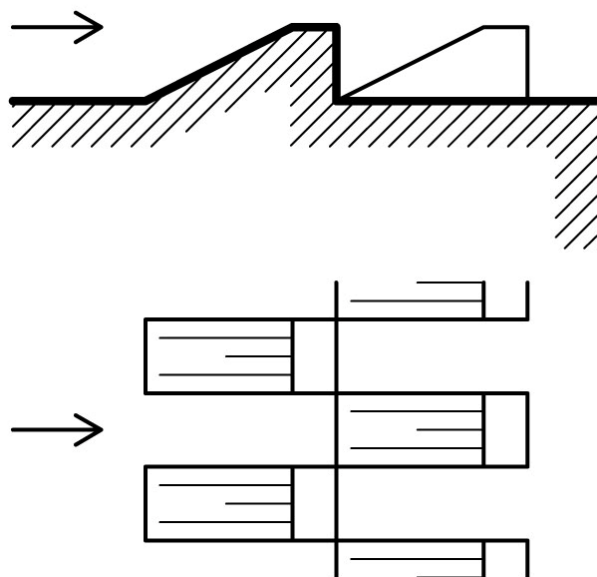
Rehbockovy rozrážeče jsou rozrážeče tvaru klínových těles, postavené čely proti proudu (obr. 28). Jejich časté použití je v rámci Rehbockova ozubeného prahu. V tomto případě se jedná o práh průřezu rovnoramenného trojúhelníku s nasazenými rozrážeči (obr. 12).



Obr. 12 Rehbockův ozubený práh – model instalovaný ve zkušebním žlabu

Smrčkovy rozrážeče

Smrčkovy rozrážeče jsou tvarově podobné Rehbockovým, jsou ale umístěné opačně, tj. čelem po vodě (obr. 13). Smrčkovou myšlenkou bylo, že není potřebné ani vhodné klást proudů překážku, do které narazí čelně. Podstata tlumicího účinku rozrážečů je v rozdělení proudu na jednotlivé paprsky. Z orientace těchto rozrážečů vyplývá jejich výhoda při přechodu splavenin a ledů, kdy jsou takto orientované rozrážeče výrazně méně poškozovány.



Obr. 13 Ozubený práh vývaru s rozrážeči podle Smrčka

2.3 PONOŘENÉ ODRAZOVÉ MŮSTKY

Dalším dnovým prvkem je možné vytvořit vodní skok s povrchovým režimem, tj. s tranzitním proudem při hladině a se spodním válcem. Výhodné je to v případech, kdy je nutno uvažovat s průchodem plovoucích předmětů, například ledových ker. Zpětné proudění při dně současně chrání objekt před podemletím. Vodní skok je zde doprovázen silně zvlněnou hladinou, která postupně stoupá až do úrovně dolní vody. Toto vlnění se může propagovat do velkých vzdáleností, proto je třeba celý ohrožený úsek dobře opevnit [1].

Nejmenší výška hrany odrazového můstku nade dnem je:

$$a_{min} = \sqrt[3]{\frac{q}{g} - h} \quad , \quad (2.1)$$

kde a_{min} minimální výška odrazové hrany [m],
 q specifický průtok [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 g tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],
 h_1 hloubka proudu nad odrazovým můstkem [m].

Zvláštní pozornost vyžaduje u odrazových můstků posouzení vlivu minimální a maximální hladiny vody v odpadním korytě. V případě nízké hladiny dolní vody se bude odrazový můstek chovat jako lyžařský můstek a proud vody jen „odhodí“. To může mít za následek

vymílání v místě dopadu, nebo navíc i vznik prostého vodního skoku dále v toku se všemi negativními dopady. V případě vysoké úrovně hladiny dolní vody (při přílišném zatopení můstku) může proud ihned za můstkem směřovat ke dnu a tvořit zde výmol.[1]

Odrasný můstek může být hladký nebo s rozrážeci. V praxi se prosadil zejména typ s rozrážeci. [1]

2.4 POUŽITÍ LYŽAŘSKÝCH MŮSTKŮ

Umístí-li se odrazový můstek nad hladinu dolní vody, nazývá se lyžařským můstkem a má kvalitativně odlišný účinek od můstku ponořeného. Lyžařský můstek směřující mírně vzhůru „odhazuje“ proud vody od paty přehrady do takové vzdálenosti, kde můžeme připustit, aby provzdušněný proud dopadající do koryta vytvořil výmol v neopevněném dně. Zde je nutno počítat, že i ve zdravé hornině skalního podloží vznikne časem rozsáhlý výmol. [1] Použití lyžařského můstku nevytváří podmínky pro vznik vodního skoku. Druhou možností je navrhnout dopad paprsku do vývaru. V tomto případě má koncová část můstku mírný poproudňý sklon, aby zbytečně neprodužoval vývar, a zpravidla bývá osazena rozrážeci.

Hlavními funkcemi odrazových můstků jsou:

- „odhození“ proudu vody do dostatečné vzdálenosti od vodního díla (zabránění podemletí)
- rozptýlení a provzdušnění výtokového paprsku a jeho rozprostření na celou šířku koryta pod můstkem.

3 ÚČEL PRÁCE

Účelem práce není modelování konkrétního reálného stavu. Účelem práce je pro jednoznačné podmínky bez prohloubeného vývaru, zjistit míru disipace energie proudu a porovnat účinnost použitých dnových prvků. Dále zhodnotit podíl jednotlivých užívaných tlumicích prvků na celkové disipaci energie. Do hodnoceného souboru prvků zahrnout i jednoduché prahy se svislými čely, které jsou ze stavebního hlediska v oblibě v poslední době.

Hodnoty účinností disipace kinetické energie nadkritického proudu nejsou v citované literatuře k dispozici, proto je jejich stanovení jedním z cílů této práce.

Zhodnotit hodnoty hloubky h_2 , potřebné pro vytvoření přilehlého vodního skoku. Hloubka h_2 je ukazatelem nutného prohloubení vývaru d .

Dílním cílem je také zhodnotit délky vodních skoků. Všechny veličiny budou srovnávány ve srovnatelných geometrických podmínkách při horizontálním dně.

4 MODEL A MĚRNÁ TRAT

4.1 MODEL

Za účelem řešení této diplomové práce byl v Laboratořích vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v Brně zhotoven hydraulický model (obr. 14). Model byl umístěn v měrném žlabu v hydraulické zkušebně v budově „B“ v areálu fakulty na ulici Veveří.



Obr. 14 Celkový protiproudni pohled na měrný žlab

Model byl během měření tvarově upravován pro jednotlivé zkoušky míry disipace pohybové energie. Varianty úpravy modelu jsou označeny V-1 až V-8 (kap. 4.1.1).

Model je tvořen deskou umístěnou na dně žlabu, umožňující ukotvení jednotlivých dnových prvků. Deska je zhotovena z voděvzdorné překližky tloušťky 20 mm. Její délkou a zkosením na začátku i na konci je zabezpečeno minimální ovlivnění proudění. Potřebné vzduší hladiny bylo vytvořeno deskou ze stejného materiálu i tloušťky. Je umístěna ve svislých drážkách žlabu tak, že otvor pod stavidlem je vysoký 47 mm. K desce je připevněn plechový profil, který zajišťuje po celé délce ostrou horní hranu otvoru (obr. 15).

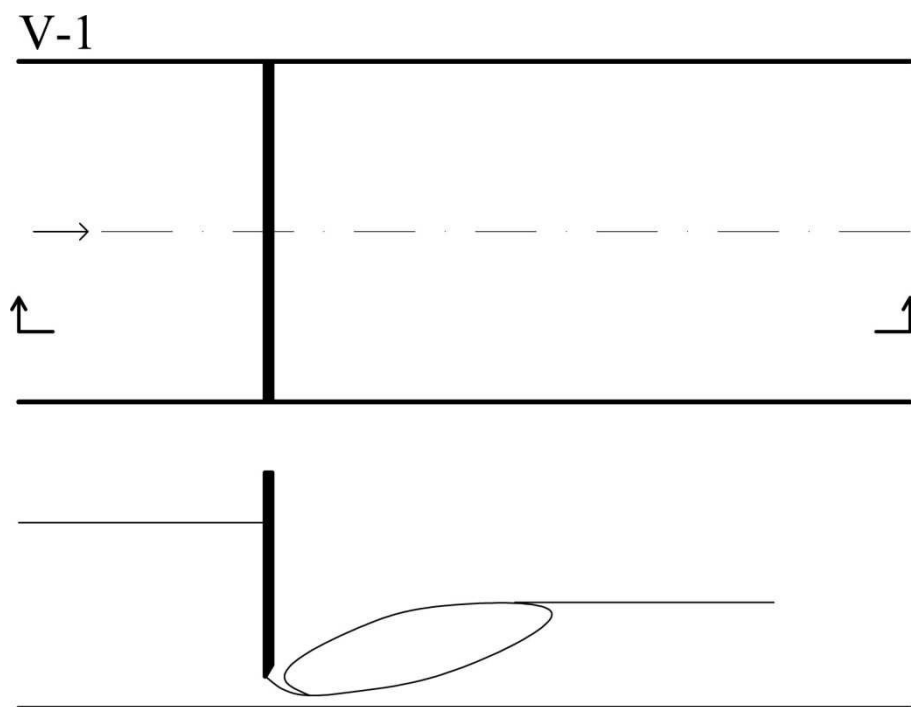


Obr. 15 Detail profilu tvořícího ostrou hranu otvoru, V-2 popravní pohled

Jednotlivé dnové prvky byly zhotoveny z extrudovaného polystyrenu a zejména v částech připevněných vruty k podkladu opatřeny na povrchu pozinkovaným plechem.

4.1.1 Zkoušené varianty

Následující schémata představují geometrické charakteristiky zkoumaných kombinací tlumicích prvků. Schémata jsou zjednodušená (není zde například vykreslena deska umístěná na dně hydraulického žlabu).



Obr. 16

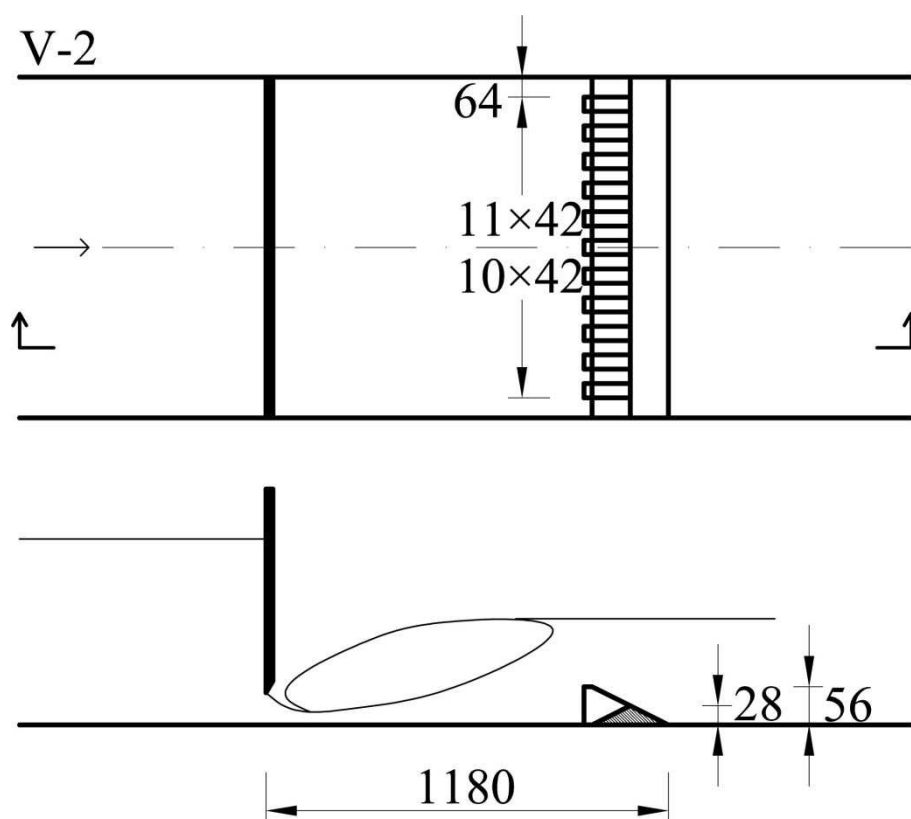
Varianta V-1

Varianta V-1: rozrážeče

žádné

závěrečný práh

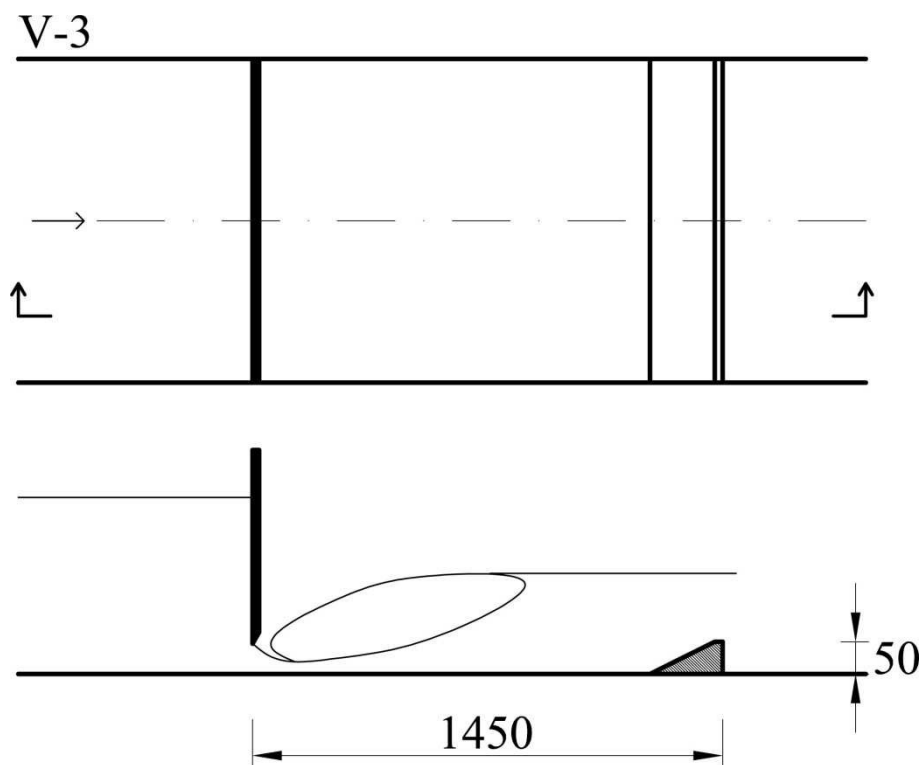
žádný



Obr. 17

Varianta V-2

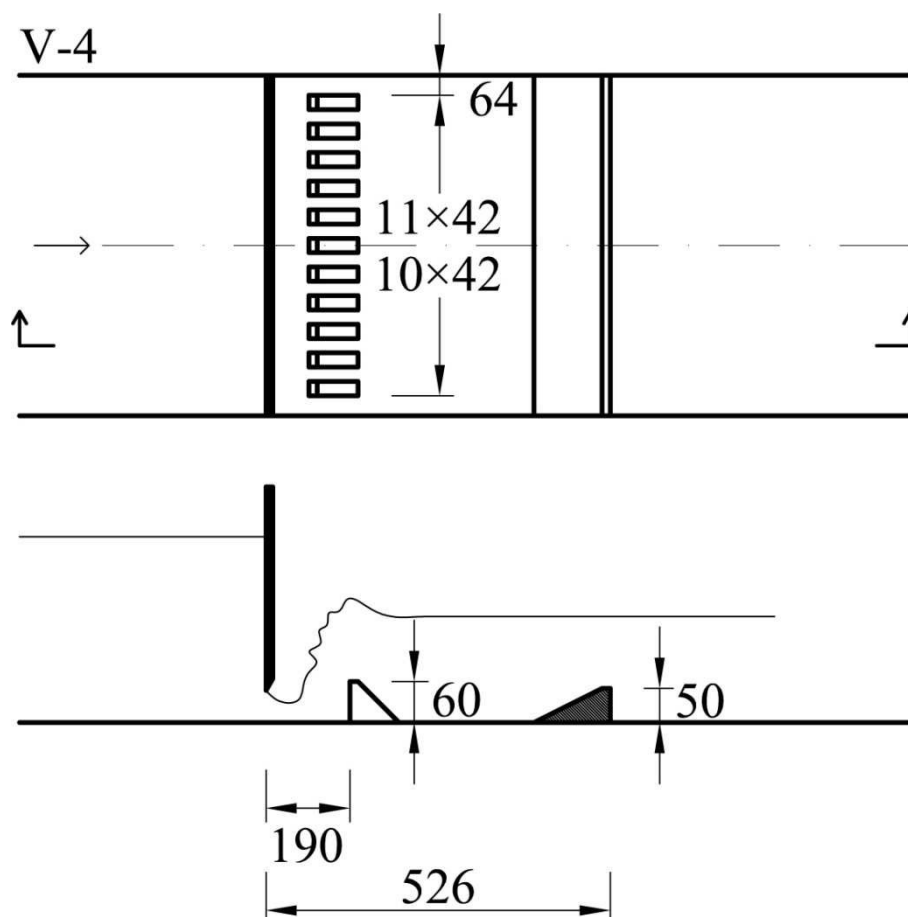
Varianta V-2:	dnové rozrážeče	žádné
	závěrečný práh	Rehbockův ozubený (Rehbockovy rozrážeče na závěrečném prahu)
	odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)	1180 mm
	výška prizmatické části prahu (výška h_p)	28 mm
	výška prahových rozrážečů (výška h_{pr})	56 mm
	šířka prahových rozrážečů	42 mm
	počet prahových rozrážečů	11
	vzájemná odlehlost prahových rozrážečů (rozteč)	42 mm



Obr. 18

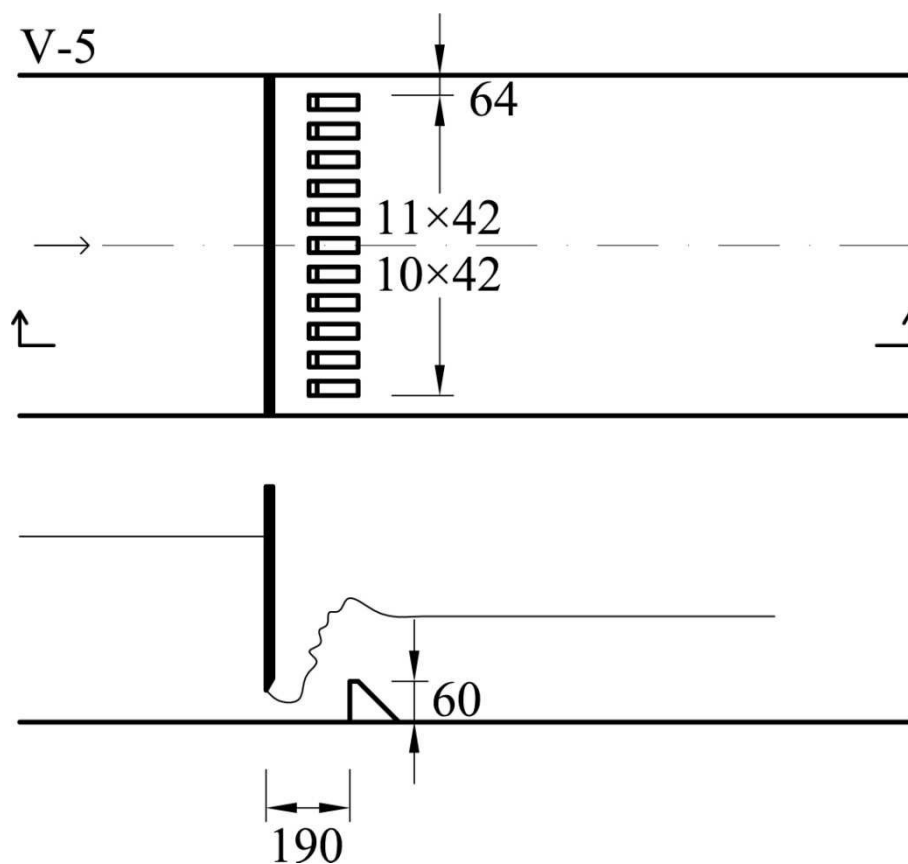
Varianta V-3

Varianta V-3:	rozrážče	žádné
	závěrečný práh	prizmatický, trojúhelníkového průřezu
	odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)	1450 mm
	výška prahu (výška h_p)	50 mm



Obr. 19 Varianta V-4

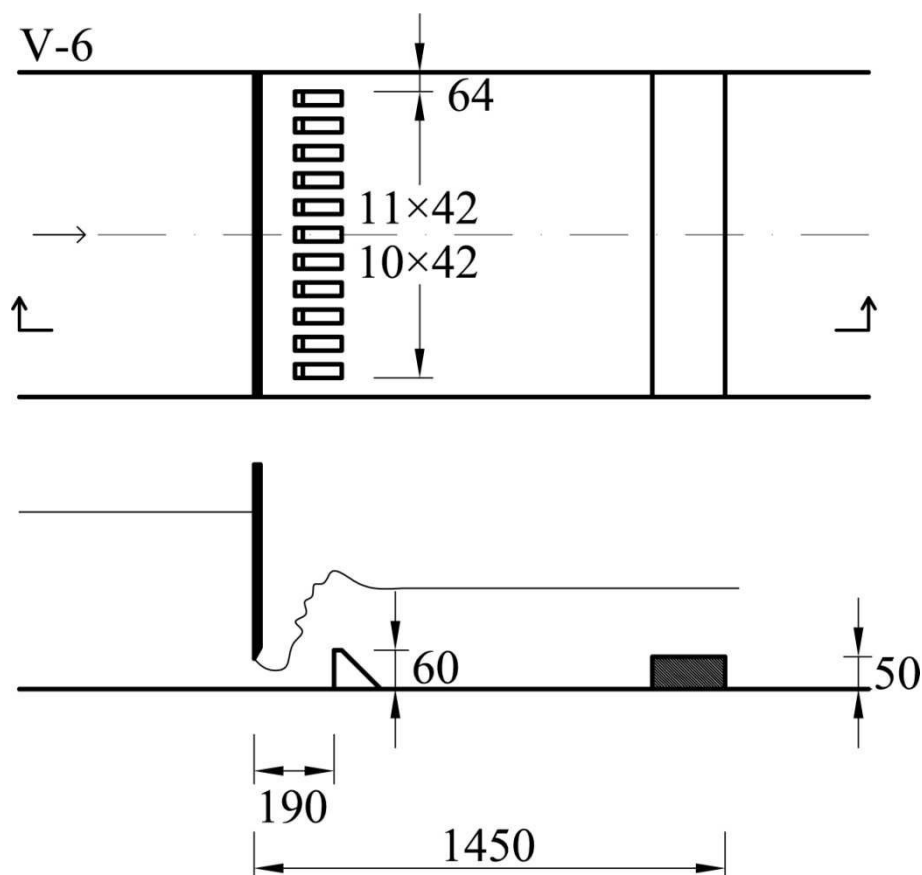
Varianta V-4:	rozházeče	dnové
odlehlost začátku rozházečů od výtokového otvoru (vzdálenost l_r)		190 mm
výška dnových rozházečů (výška h_r)		60 mm
šířka prahových rozházečů		42 mm
počet prahových rozházečů		11
vzájemná odlehlost prahových rozházečů (rozteč)		42 mm
závěrečný práh		prizmatický, trojúhelníkového průřezu
odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)		1450 mm
výška prahu (výška h_p)		50 mm



Obr. 20

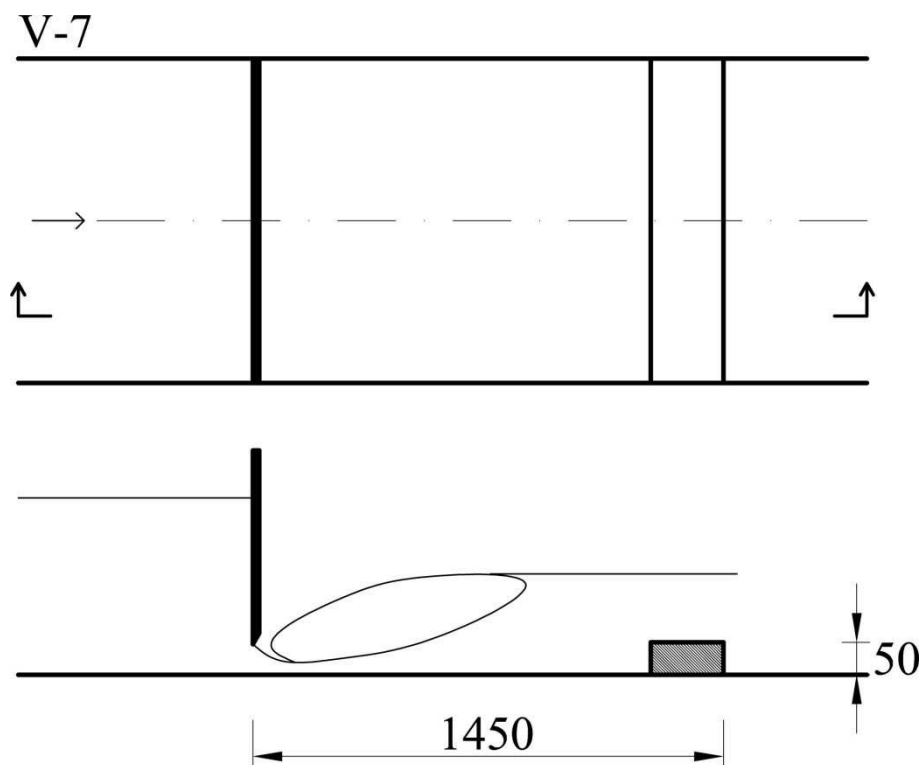
Varianta V-5

Varianta V-5:	rozrážeče	dnové
odlehlost začátku rozrážečů od výtokového otvoru (vzdálenost l_r)		190 mm
výška dnových rozrážečů (výška h_r)		60 mm
šířka prahových rozrážečů		42 mm
počet prahových rozrážečů		11
vzájemná odlehlost prahových rozrážečů (rozteč)		42 mm
závěrečný práh		žádný



Obr. 21 Varianta V-6

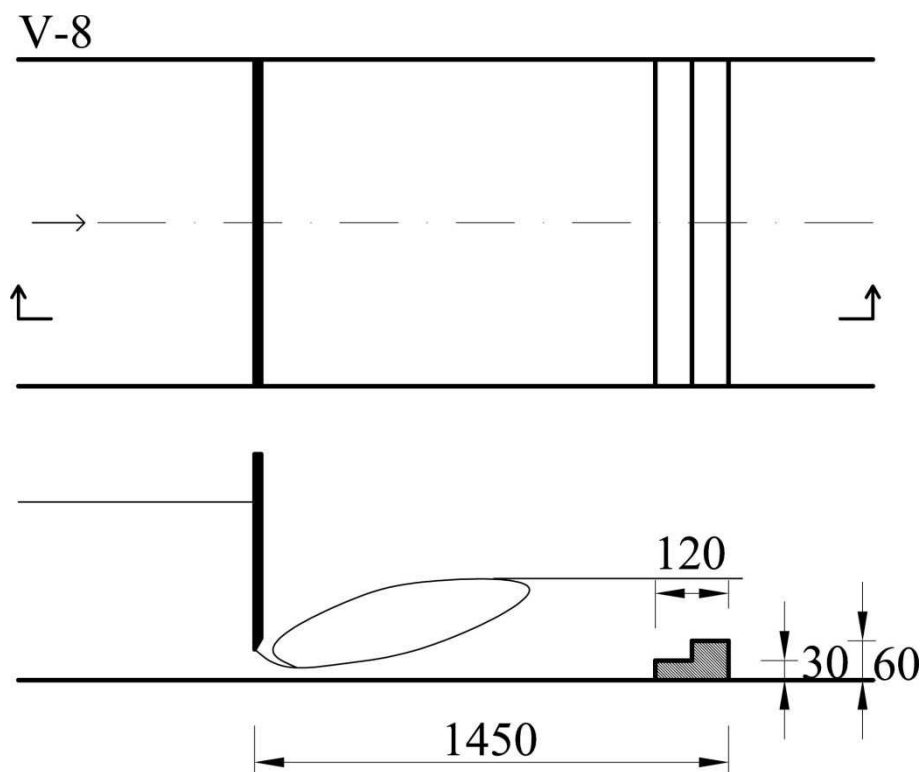
Varianta V-6:	rozzřeče	dnové
odlehlost začátku rozřečů od výtokového otvoru (vzdálenost l_r)	190 mm	
výška dnových rozřečů (výška h_r)	60 mm	
šířka prahových rozřečů	42 mm	
počet prahových rozřečů	11	
vzájemná odlehlost prahových rozřečů (rozteč)	42 mm	
závěrečný práh	prizmatický, obdélníkového průřezu	
odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)	1450 mm	
výška prahu (výška h_p)	50 mm	



Obr. 22

Varianta V-7

Varianta V-7:	rozrážče	žádné
	zavěrečný práh	prizmatický, obdélníkového průřezu
	odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)	1450 mm
	výška prahu (výška h_p)	50 mm



Obr. 23

Varianta V-8

Varianta V-8:	rozrážeče	žádné
	závěrečný práh	prizmatický, schodovitý
	odlehlost konce prahu od výtokového otvoru (vzdálenost l_p)	1450 mm
	výška prahu (výška h_p)	60 mm

4.2 MĚRNÁ TRAŤ

Žlab, ve kterém byl model umístěn je široký 1,01 m a je součástí uzavřeného (cirkulačního) okruhu, jehož čerpadla jsou poháněna motory s frekvenčními měniči. Voda přitékající do žlabu je přiváděna přes měrný Thomsonův přeliv. Úroveň hladiny před přelivem snímá v reálném čase ultrazvukový snímač. Manipulaci s úrovní dolní vody umožňoval žaluziový uzávěr (obr. 24) na konci žlabu. Voda odtékající ze žlabu je odváděna zpět do akumulací nádrže nacházející se pod podlahou laboratoře.

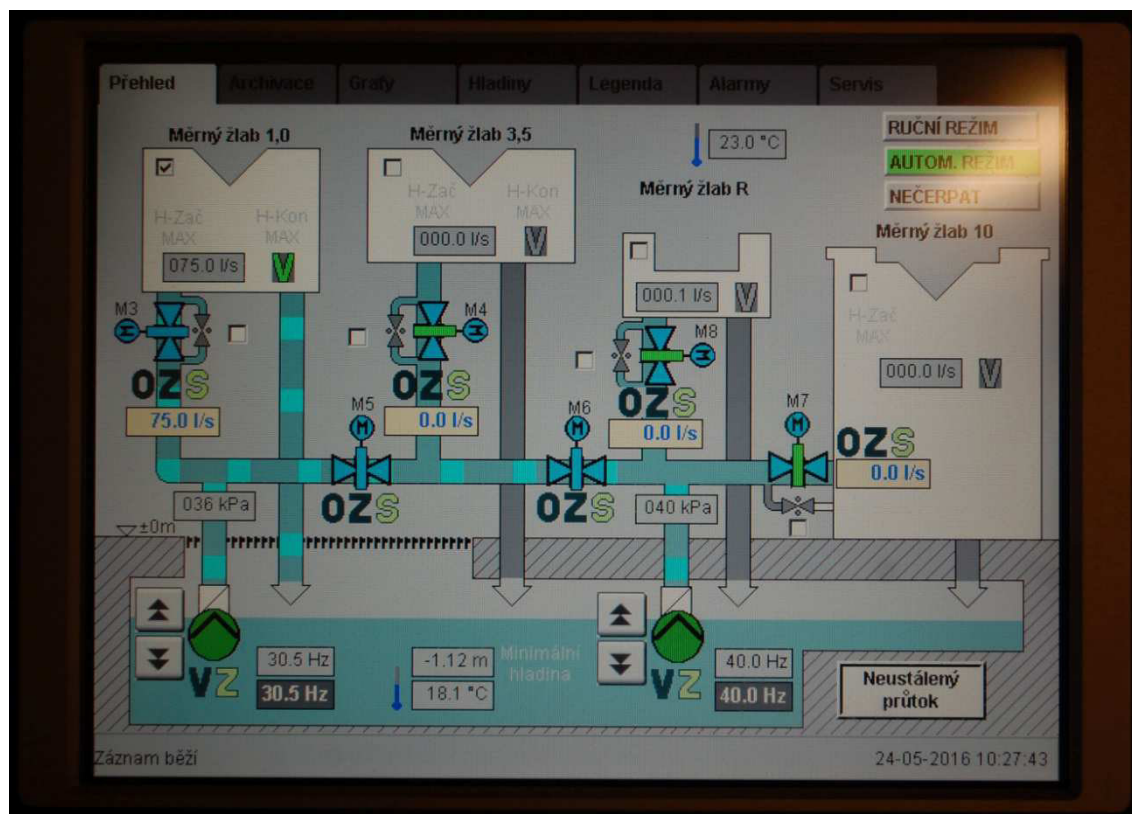


Obr. 24 Plně otevřený žaluziový uzávěr na konci žlabu

Hydraulické okruhy v této laboratoři jsou ovládány řídicím systémem s možností automatizovaného nebo ručního režimu. V tomto systému jsou ustálené (v čase neměnné) průtoky v měrných žlabech dosahovány pomocí PID (proporcionálního-integračního-derivačního) regulátoru. Frekvenční měniče motorů čerpadel jsou řízeny PID regulátorem podle velikosti regulační odchylky. Regulační odchylka je rozdíl mezi požadovaným a skutečným aktuálním průtokem. Aktuální průtok je systémem stanoven ze známých charakteristik Thomsonova přelivu a známé přepadové výšky (ultrazvukové čidlo). Použitý hydraulický okruh žlabu umožňuje měření při ustálených průtocích v rozsahu $Q = (0,4 \div 150,0) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. V rámci měření pro potřeby

této práce jsem využil průtoky v rozmezí $Q = (60 \div 120) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Rozlišovací schopnost čidla je 0,25 mm, přesnost hloubky měřené čidlem je do 1 mm.

Požadované průtoky jsem nastavoval prostřednictvím dotykového displeje řídicího systému (obr. 25). Hodnoty hloubek z ultrazvukových čidel jsem odečítal na příslušných digitálních displejích (obr. 26).



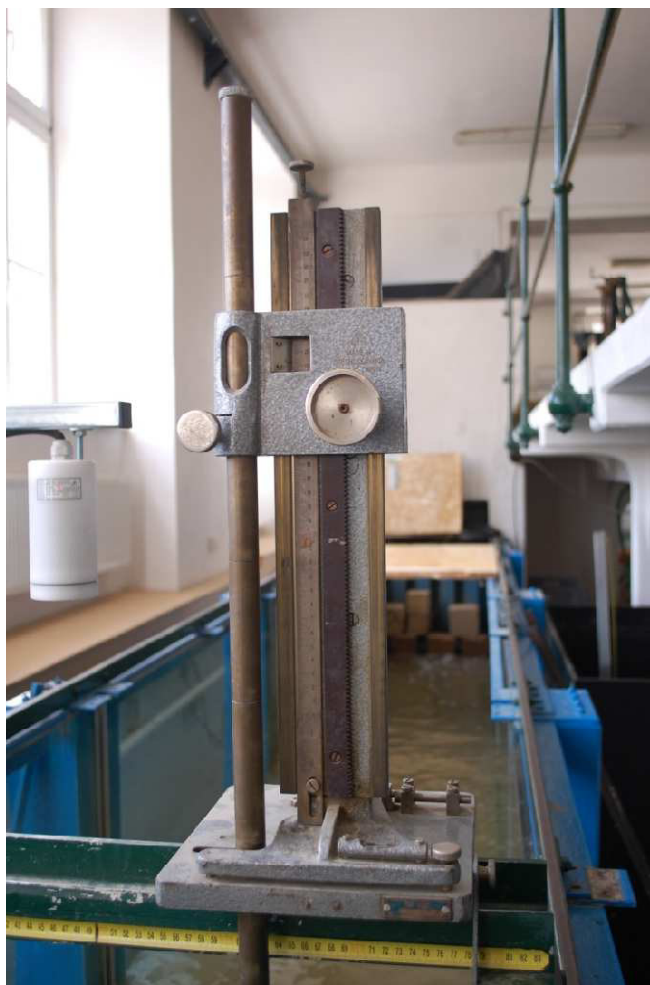
Obr. 25 Dotykový displej řídicího systému ($75 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$)



Obr. 26 Displej pro odečet hloubky měřené ultrazvukovým čidlem

4.2.1 Měřicí technika

Hloubka vody před stavidlem a hloubka dolní vody za vodním skokem byly měřeny ultrazvukovými snímači hladiny, které jsou součástí měrného žlabu (obr. 14, obr. 27). Tyto snímače jsou umístěny přibližně ve svislé rovině symetrie. Hloubka kontrahovaného proudu vody za výtokem pod stavidlem byla měřena hrotovým měřidlem (obr. 27) umístěným na pojízdném vozíku nad měrným žlabem. Tímto měřidlem byly zjištěny i hloubky horní a dolní vody pro počáteční i následné kalibrace ultrazvukových snímačů. Přesnost měření ultrazvukovým snímačem je 1 mm. Vzhledem k dynamice proudu a příčným a podélným vlnám byly hodnoty z ultrazvukových snímačů v průběhu měření průměrovány. Hodnoty hloubek byly odečítány z displejů řídicí jednotky.



Obr. 27 **Detail hrotového měřidla, vlevo ultrazvukový snímač hladiny**

Vybrané stavy byly rovněž fotografovány. K pořízení fotodokumentace byl použit fotoaparát Nikon D-40 s objektivem se systémem redukce vibrací a rozsahem ohniskových vzdáleností $(18 \div 55) \text{ mm}$ ($(27,0 \div 82,5) \text{ mm}$ po přepočtení na 35 mm kinofilm).

4.3 MODELOVÁ PODOBNOST

V případě, že na modelu i na skutečném díle převažují v ovlivňování proudění gravitační síly, platí pro vzájemný přepočtení modelové podobnosti Froudovo kritérium modelové podobnosti:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l} , \quad (4.1)$$

kde Fr.....Froudovo kritérium,
 vprůměrná rychlost,
 g tíhové zrychlení,
 l charakteristický délkový rozměr.

Hodnota Froudova kritéria musí být pro proudový jev na díle i na modelu shodná. Pro další přepočty délek, rychlostí a průtoků platí:

$$l_d = l_m \cdot M , \quad (4.2)$$

$$v_d = v_m \cdot M^{0,5} , \quad (4.3)$$

$$Q_d = Q_m \cdot M^{2,5} , \quad (4.4)$$

kde l délkový rozměr,
 vrychlost,
 Q průtok,
 Mměřítko podobnosti,
 $Index_d$veličina na díle,
 $Index_m$veličina na modelu.

Výsledky výzkumu je možné při splnění Froudova kritéria přepočítat na další objekty za předpokladu nezkreslení silami způsobenými viskozitou (vliv kinematické viskozity ν) ani silami povrchového napětí. Mezní podmínky pro sledovaný hydraulický jev uvedené v [9] byly v našem případě splněny.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

5.1 POSTUP ZKOUŠEK

Zkoušky na modelu probíhaly ve dnech 24. až 26. 5. 2015, 30. 5. 2015 až 2. 6. 2015.

5.1.1 Úpravy modelu

Samotná práce v laboratoři zahrnovala technické úpravy modelu na požadovanou variantu V-1 až V-8 a měření vybraných geometrických veličin. Jednotlivé úpravy se skládaly z kombinací prvků:

- dnové rozrážeče výšky $h_r = 60$ mm ve vzdálenosti $l_r = 190$ mm (obr. 28)
- prizmatický závěrečný práh trojúhelníkového průřezu výšky $h_p = 50$ mm ve vzdálenosti $l_p = 1450$ mm (obr. 29)
- prizmatický závěrečný práh obdélníkového průřezu výšky $h_p = 50$ mm ve vzdálenosti $l_p = 1450$ mm (obr. 30)
- prizmatický schodovitý závěrečný práh výšky $h_p = 60$ mm ve vzdálenosti $l_p = 1450$ mm (obr. 31)
- Rehbockův ozubený závěrečný práh výšky $h_p = 28$ mm s rozrážeči výšky $h_r = 56$ mm do vzdálenosti $l_p = 1180$ mm (obr. 12)

Jednotlivé prvky byly stabilizovány připevněním šroubovými spoji k podkladní desce umístěné na dně žlabu.

Varianty, které měly některý prvek společný, byly měřeny po sobě, aby se minimalizovala časová náročnost přestaveb.



Obr. 28 Dnové rozrážeče (V-4, V-5, V-6)



Obr. 29 Závěrečný práh trojúhelníkového průřezu



Obr. 30 Závěrečný práh obdélníkového průřezu – protiproudni pohled



Obr. 31 Schodovitý závěrečný práh

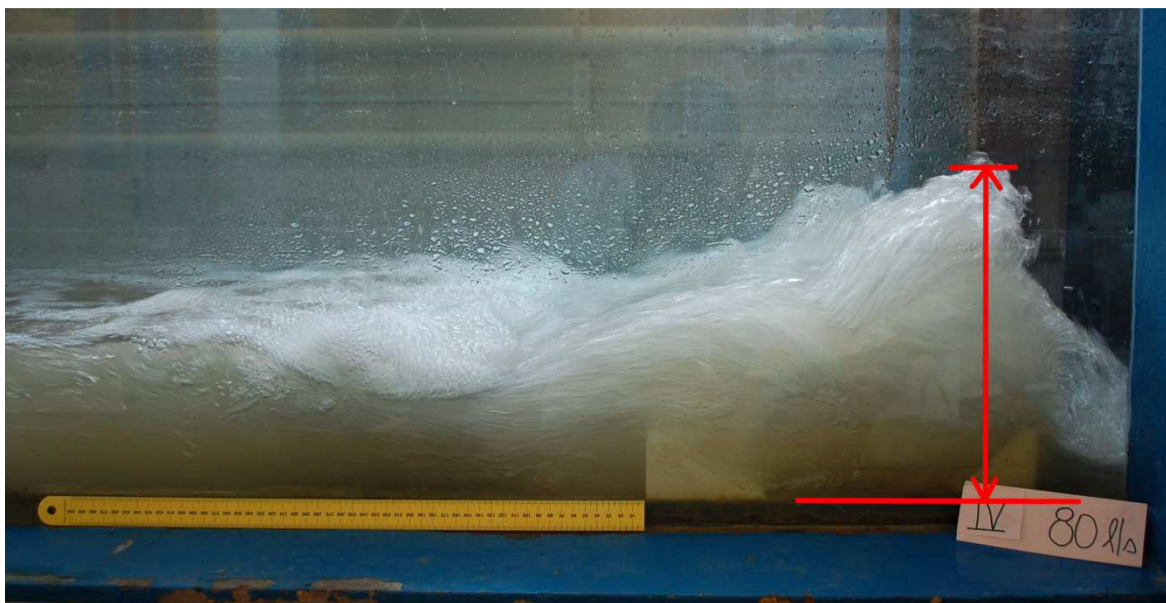
5.1.2 Vlastní měření

Pro každou z variant V-1 až V-8 jsem na modelu při třinácti různých průtocích vytvořil regulaci úrovně dolní vody zahrazením takové hladinové poměry, při kterých vznikl přilehlý vodní skok. Měřil jsem tedy celkem 104 kombinací prostorového uspořádání modelu a průtoků. Průtoky jsem vybíral z rozmezí $Q = (60 \div 120) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, rozdíl průtoků mezi jednotlivými měřeními byl $\Delta Q = 5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Postup vlastního měření spočíval v uzavření žaluziového uzávěru na konci žlabu, navolení žádaného průtoků na panelu řídicího systému a vyčkání na ustálení průtoků. Po ustálení průtoků jsem postupně pootevíral žaluziový uzávěr. Tím jsem snižoval hladinu dolní vody poproudě za stavidlem až do okamžiku, kdy byly vytvořeny podmínky pro vznik přilehlého vodního skoku ($h_d = h_2$). Regulace hladiny dolní vody pomocí žaluziového uzávěru byla časově nejnáročnější částí. Při jakékoli manipulaci s uzávěrem jsem musel počkat několik minut do ustálení hladiny a až poté znovu manipulovat. Toto jsem opakoval až do okamžiku, kdy úroveň ustálené hladiny dolní vody odpovídala přilehlému vodnímu skoku.

V některých případech, zejména při malých hodnotách průtoků, nebylo možné dosáhnout tak nízké úrovně hladiny dolní vody, která by dovolila vznik přilehlého vodního skoku. Minimální úroveň hladiny vody ve žlabu vyplývá z kritické hloubky na jeho konci. Ta je dána šířkou žlabu a konkrétním průtokem.

Zůstal-li vytvořený přilehlý vodní skok stabilní, změřil jsem požadované měřené veličiny (Q ; h_h ; h_d ; h_{\max} ; $L_{\text{měř}}$). Průtok Q žlabem a hloubky h_h a h_d jsem odečítal z displeje řídicího systému laboratoře. Nejvyšší výstup hladiny h_{\max} jsem měřil ocelovým měřidlem přes skleněnou stěnu žlabu. Délku vodního skoku jsem měřil svinovacím metrem rovněž přes stěnu žlabu.



Obr. 32 **Znázornění nejvyššího výstupu hladiny h_{\max} (V-4, $80 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$)**

Pozn.: Nejvyšší výstup hladiny h_{\max} jsem měřil pouze tehdy, když se lišil od hloubky h_d . Týkalo se to variant V-4, V-5 a V-6, tedy variant s dnovými rozrážeci.

5.2 ZJIŠTĚNÉ CHARAKTERISTIKY

5.2.1 Měření

Přímým měřením na modelu jsem zjišťoval následující veličiny:

- | | | |
|--|------------------|--------------------------------|
| • Aktuální průtok modelem | Q | $[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$ |
| • Hloubku vody před stavidlem (doplňující informace) | h_h | $[\text{mm}]$ |
| • Hloubku kontrahovaného výtokového paprsku,
kterou považuji za první vzájemnou hloubku vodního skoku | h_c | $[\text{mm}]$ |
| • Hloubka vody v odpadním korytě | h_d | $[\text{mm}]$ |
| • Maximální výstup hladiny ve vývaru | h_{\max} | $[\text{mm}]$ |
| • Délka vodního skoku | $L_{\text{měř}}$ | $[\text{mm}]$ |

5.2.2 Odvozené

Následující veličiny jsem zjistil z veličin měřených výpočtem:

- Plocha průtočného průřezu profilu nad stavidlem S_h $[m^2]$
- Rychlost proudu v profilu nad stavidlem ($v_1 = Q/S_1$) v_h $[m \cdot s^{-1}]$
- Froudovo kritérium v profilu nad stavidlem Fr_h $[-]$
- Měrnou energii průřezu v profilu nad stavidlem E_h $[mm]$
- Plocha průtočného průřezu profilu kontrakce S_c $[m^2]$
- Rychlost proudu v profilu kontrakce ($v_c = Q/S_c$) v_c $[m \cdot s^{-1}]$
- Froudovo kritérium v profilu kontrakce Fr_c $[-]$
- Měrnou energii průřezu v profilu kontrakce E_c $[mm]$
- Plocha průtočného průřezu profilu dolní vody S_d $[m^2]$
- Rychlost proudu v profilu dolní vody ($v_d = Q/S_d$) v_d $[m \cdot s^{-1}]$
- Froudovo kritérium v profilu dolní vody Fr_d $[-]$
- Měrnou energii průřezu v profilu dolní vody E_d $[mm]$
- Rozdíl měrných energií profilů kontrakce a dolní vody ΔE $[mm]$
 $\Delta E = E_c - E_d$
- Podíl rozdílu měrných energií průřezů kontrakce a dolní vody
a měrné energie průřezu kontrakce $\Delta E/E_c$ $[-]$
- Podíl hloubky dolní vody a kontrahované hloubky h_d/h_c $[-]$

Pro konfiguraci 1 (bez rozrážeců a prahů) jsem stanovoval teoretické hodnoty:

- Teoretická druhá vzájemná hloubka vodního skoku
v prizmatickém obdélníkovém vývaru

$h_{2;\text{teor}}$ [mm]

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2}) [10] \quad (5.1)$$

- Délka vodního skoku podle Smetany

L_{Smetana} [mm]

$$L_{\text{Smetana}} = 6 (h_2 - h_1) \quad (5.2)$$

- Délka vodního skoku podle Pavlovského

$L_{\text{Pavlovský}}$ [mm]

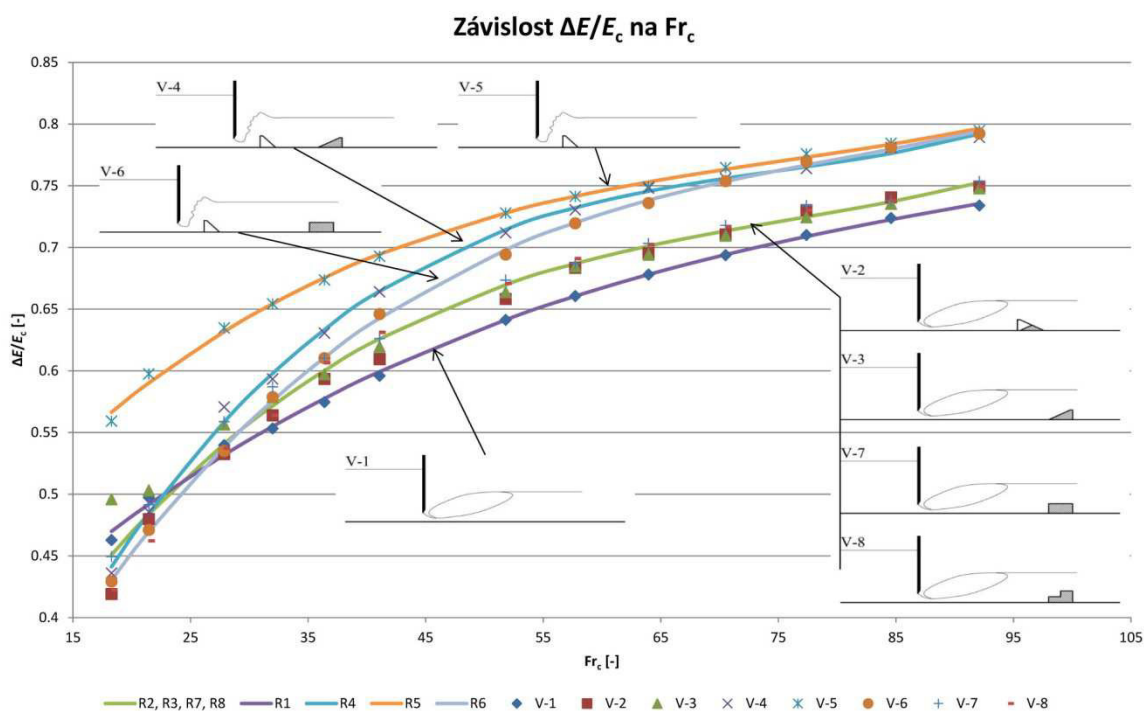
$$L_{\text{Pavlovský}} = 2,5 (1,9h_2 - h_1) \quad (5.3)$$

6 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Cílem měření bylo porovnání zkoušených variant z hlediska účinnosti disipace kinetické energie proudu. Vyhodnocení je provedeno na základě měření osmi modelových sestav (V-1 až V-8), u každé při třinácti hodnotách průtoku. Změřeno bylo celkem 104 kombinací stavů.

6.1 ÚČINNOST TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE

Účinnost tlumení kinetické energie proudu jednotlivými dnovými prvky jsem vyjádřil pomocí poměru rozdílu měrných energií průřezů v profilech kontrakce a dolní vody ku měrné energii průřezu v profilu kontrakce $\Delta E/E_c$. Tato porovnávaná míra disipace vyjádřená takto poměrově (procentuálně) představuje výstižnou a spolehlivou informaci pro celý zkoušený rozsah stavů s přílehlým vodním skokem.



Obr. 33 Graf závislosti $\Delta E/E_c$ na Fr_c

Pozn.: Ve většině následujících grafů jsou veličiny vyneseny bodově. Jimi je vedena křivka vyjadřující polynomicou regresní rovnici třetího řádu. Postup vyhodnocení pomocí regresních rovnic jsem zvolil pro lepší přehlednost znázornění výsledků. Pomocí

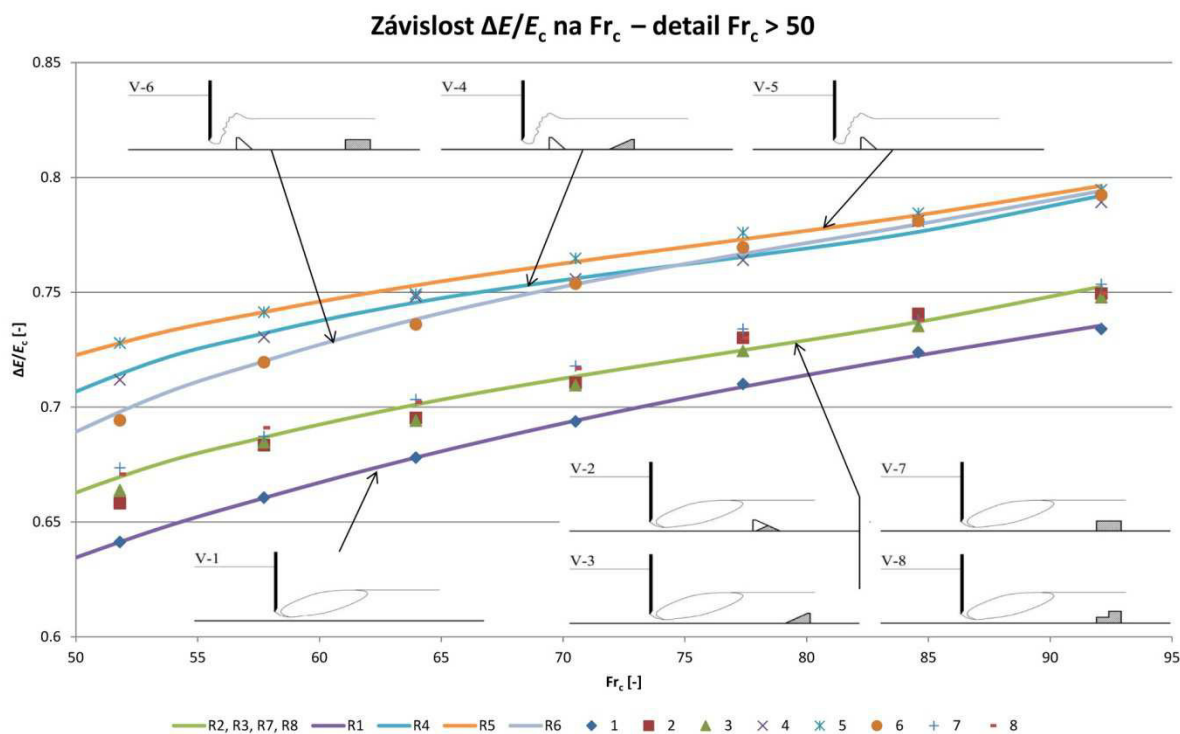
regresních rovnic jsem odstranil drobné nepřesnosti měření, které způsobovaly „rozvlnění“ grafů.

Při vyhodnocování jsem zjistil, že varianty V-2, V-3, V-7 a V-8 (varianty bez rozrážečů, se závěrečným prahem) se téměř shodují v účinnosti tlumení $\Delta E/E_c$ a to v celém rozsahu měření. Z tohoto důvodu jsou tyto varianty v grafech zastoupeny pouze jednou regresní křivkou, která dobře reprezentuje každou z nich. Z podmínek pro toto zjednodušení také plyne jeden ze závěrů: Při takto vzdáleném prahu ($L \approx 5h_2$) není jeho tvar pro míru disipované energie rozhodující.

Z grafu na obrázku 33 je patrné, že s rostoucí hodnotou Froudova kritéria roste i míra zmařené energie $\Delta E/E_c$. V pravé části grafu je vidět rozdělení variant na tři skupiny podle míry zmařené energie:

- Varianty s rozrážeči V-4, V-5, V-6
- Varianty s prahy, bez rozrážečů V-2, V-3, V-7, V-8
(reprezentované jednou křivkou)
- Varianta s prostým vodním skokem V-1


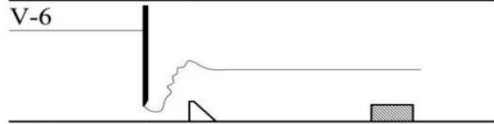
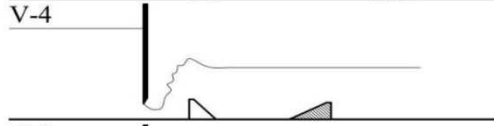





V rámci těchto skupin jsou v oblasti přibližně s $Fr_c > 60$ mezi jednotlivými variantami jen zanedbatelné rozdíly. Toto ilustruje graf na obrázku 34.



Obr. 34 Graf závislosti $\Delta E/E_c$ na Fr_c – detail $Fr_c > 50$






Tabulka 1 obsahuje varianty modelu sestupně řazené podle míry disipované energie při $Fr_c = 92$ ($Q_m = 120 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tab. 1 Seřazení variant podle míry disipace energie pro $Fr_c = 92$

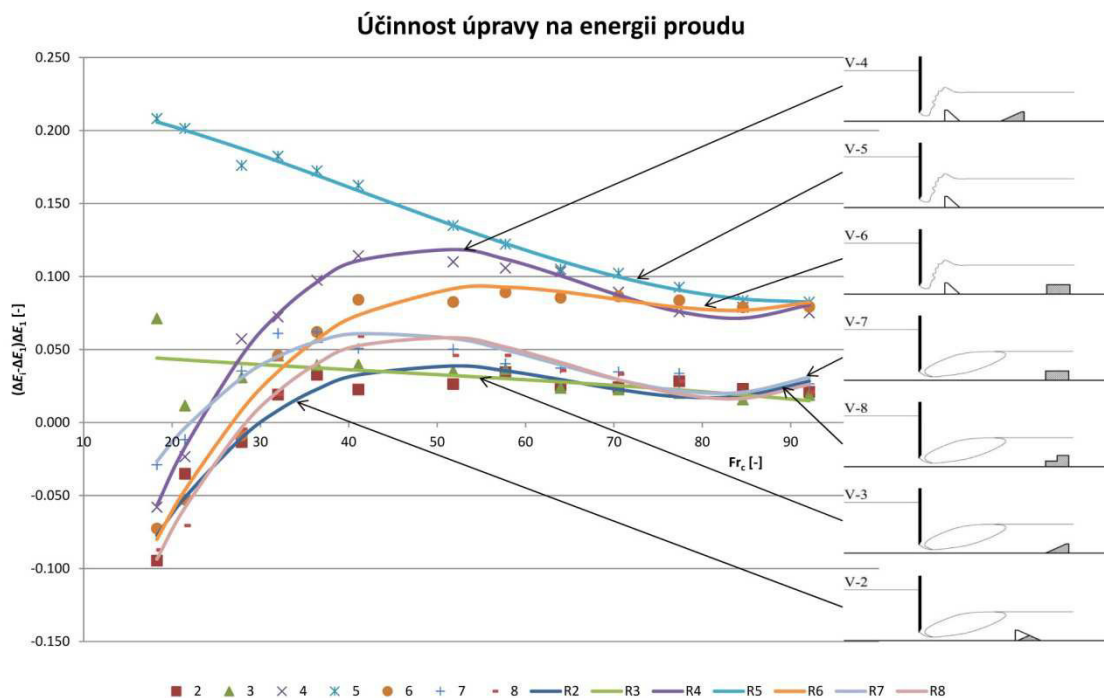
$Fr_c = 92$				V-5 
Varianta	$[-]$ $\Delta E / E_c$	$[-]$ h_d / h_c	$[-]$ L / h_d	
V-5	0.795	9.200	1.622	V-6 
V-6	0.792	9.320	1.592	
V-4	0.789	9.480	2.329	V-4 
V-7	0.754	11.280	3.667	V-7 
V-2	0.749	11.480	3.530	V-2 
V-8	0.749	11.480	3.721	V-8 
V-3	0.748	11.560	4.042	V-3 
V-1	0.734	12.240	4.131	V-1 

Tabulka 2 porovnává tytéž veličiny jako tabulka 1, jen při nižší hodnotě Froudova kritéria ($Fr_c = 52$, $Q_m = 90 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$). Pořadí variant je odlišné od pořadí v předchozí tabulce, ale skupiny jsou zachovány i při těchto nižších hodnotách Froudova kritéria.

Tab. 2 Seřazení variant podle míry disipace energie pro $Fr_c = 52$

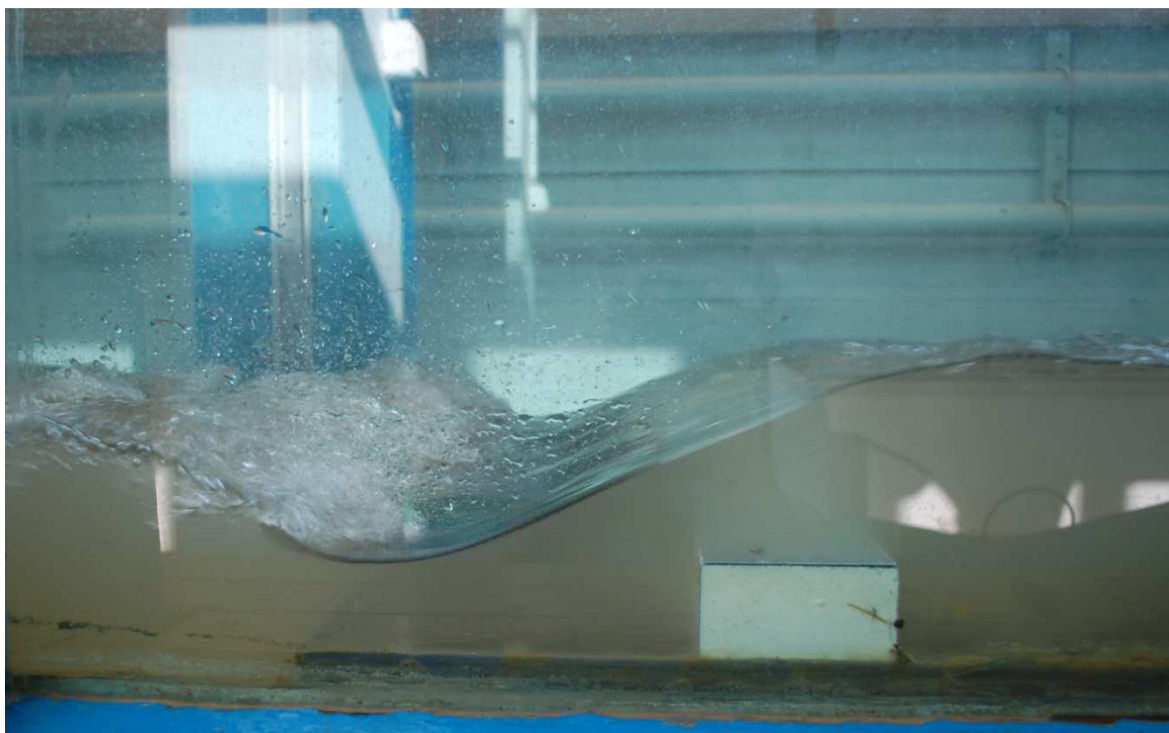
$Fr_c = 52$				V-5 
Varianta	$[-]$ $\Delta E / E_c$	$[-]$ h_d / h_c	$[-]$ L / h_d	
V-5	0.728	6.880	2.558	V-4 
V-4	0.712	7.360	1.707	
V-6	0.694	7.880	1.807	V-6 
V-7	0.674	8.480	4.047	
V-8	0.671	8.560	3.491	V-8 
V-3	0.664	8.760	4.237	
V-2	0.658	8.920	3.321	V-2 
V-1	0.641	9.400	3.787	

Nejúčinnější tlumení energie ze všech zkoušených variant jsem zjistil u variant s dnovými rozrážeci. Jsou to V-4, V-5 a V-6. V celém rozsahu měření byla nejučinnější varianta V-5.



Obr. 35 Účinnost úpravy na energii proudu

Vysoké hodnoty účinnosti tlumení energie varianty V-5 při nižších hodnotách Froudova kritéria ($Fr_c < 50$) oproti ostatním variantám jsou způsobeny tím, že tato varianta je jediná, která obsahuje rozrážeče, ale neobsahuje závěrečný práh. U ostatních variant z první skupiny (V-4 a V-6) se při nízkých průtocích vytváří podružný vodní skok za závěrečným prahem (obr. 36). K potlačení vzniku tohoto podružného vodního skoku je zapotřebí vyšší úrovně hladiny h_d . Tato vyšší úroveň hladiny způsobuje snížení účinnosti tlumicího efektu v oblasti $Fr_c < 50$.



Obr. 36 Podružný vodní skok za závěrečným prahem (V-6, 60 l·s⁻¹)

Nevýhodou, kterou s sebou nese vysoká účinnost tlumení energie pomocí dnových rozrážečů je výstup hladiny v oblasti rozrážečů a s tím spojené výstřiky vody do okolí. S výstupy hladiny v prostoru vývaru je nutné počítat při návrhupřevýšení bočních stěn. Tabulka 3 vyjadřuje poměr maximálního výstupu hladiny ku úrovni hladiny dolní vody h_{\max}/h_d pro varianty, kde se nejvyšší výstup hladiny lišil od úrovně dolní vody. Tabulka vyjadřuje stavy při nejvyšším průtoku modelem a je řazena sestupně podle míry tlumení energie.

Tab. 3 Porovnání účinnosti tlumení a nejvyšších výstupů hladiny pro $Fr_c = 92$

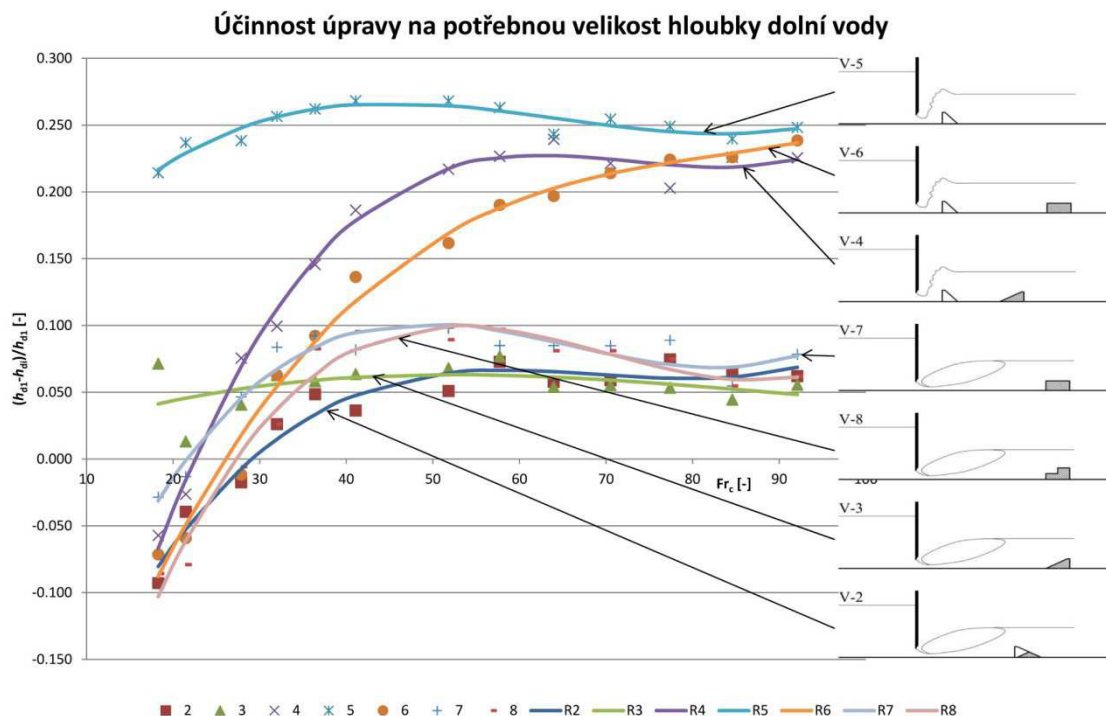
$Fr_c = 92$			
Varianta	[-]	[-]	
	$\Delta E / E_c$	h_{\max} / h_d	
V-5	0.795	1.826	
V-6	0.792	1.738	
V-4	0.789	2.046	

Úroveň nejvyššího výstupu hladiny byla u variant V-4, V-5 a V-6 vysoká i při nižších průtocích. Při průtocích $Q > 85 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ($Fr_c > 41$) se pohybovala v rozmezí $h_{\max} = (1,45 \div 2,05) h_d$. Tyto hodnoty spolu s mírami disipované energie pro jednotlivé varianty V-4 až V-6 nabízí tabulka 4.

Tab. 4 Přehled h_{\max}/h_d pro varianty V-4, V-5 a V-6 pro průtoky
 $Q_m = (85 \div 120) \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, $Fr \approx (41 \div 92)$

		V-4		V-5		V-6	
$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
Q_m	Fr_c	$\Delta E/E_c$	h_{\max}/h_d	$\Delta E/E_c$	h_{\max}/h_d	$\Delta E/E_c$	h_{\max}/h_d
85	41.08	0.664	1.62	0.693	2.20	0.646	1.47
90	51.80	0.712	1.55	0.728	2.03	0.694	1.42
95	57.72	0.731	1.60	0.741	2.03	0.720	1.45
100	63.95	0.748	1.68	0.749	1.79	0.736	1.49
105	70.51	0.756	1.61	0.765	1.83	0.754	1.57
110	77.38	0.764	1.61	0.776	1.87	0.770	1.67
115	84.58	0.781	1.75	0.784	1.76	0.781	1.64
120	92.09	0.789	2.05	0.795	1.83	0.792	1.74

6.2 POTŘEBNÁ HLOUBKA DOLNÍ VODY



Obr. 37 Účinnost úpravy na potřebnou velikost hloubky dolní vody

Potřebná úroveň hladiny dolní vody koresponduje s účinností tlumení kinetické energie. Graf na obrázku 37 porovnává potřebnou velikost hloubky dolní vody jednotlivých variant úprav s variantou bez úpravy (V-1). Z grafu vyplývá, že u variant V-4, V-5 a V-6 při $Fr_c > 65$ je potřebná hloubka dolní vody o 20 až 25 % nižší než u varianty bez úpravy.

U ostatních variant takto získáme možnost snížit úroveň hladiny dolní vody o 5 až 10 % proti variantě V-1.

6.3 DÉLKA VODNÍHO SKOKU

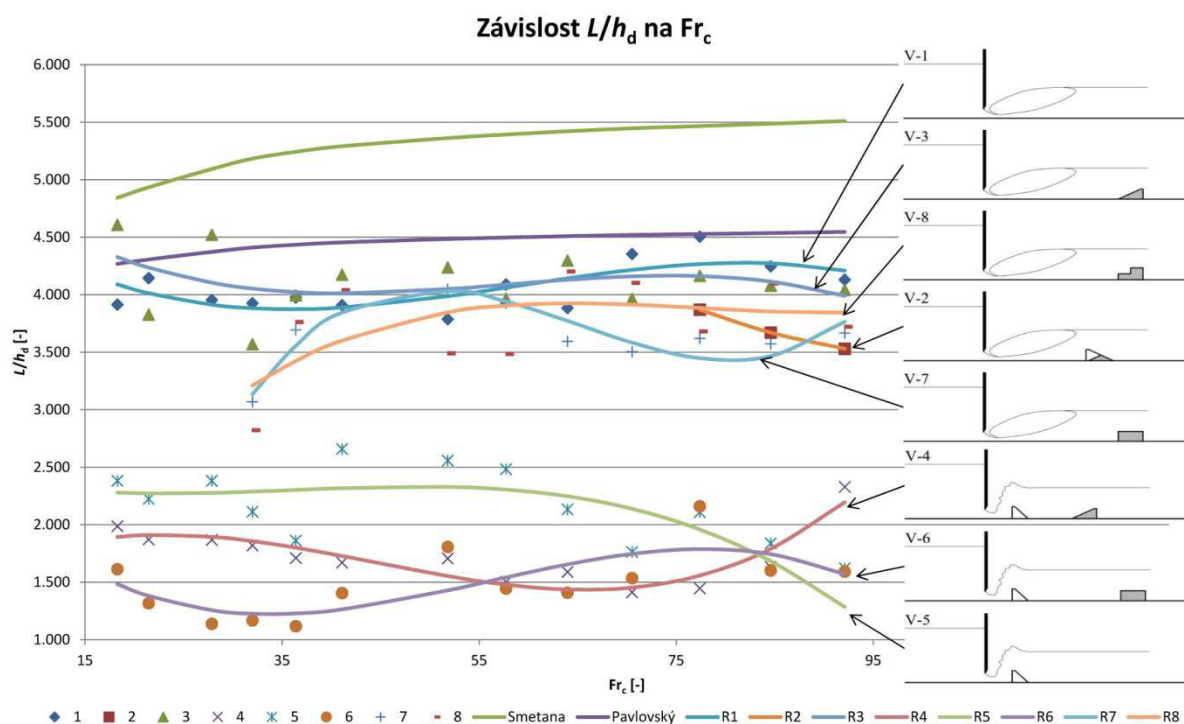
Vyhodnocování vlivu úprav modelu na délku vodního skoku je složitější. Délka vodního skoku je z velké části určena geometrickými parametry vývaru. V modelovém případě zejména vzdáleností rozrážeců a prahů od profilu výtoku otvoru. Profily konce vodního skoku se zejména při variantách bez závěrečného prahu měnily v čase. Vodní skok pulzoval. V těchto případech jsem hodnoty délky vodního skoku L průměroval v čase, abych touto hodnotou co nejpřesněji popsal modelovaný stav.

Z grafu na obrázku 38 je zřejmé, že výrazně kratší vodní skoky se vytvářejí při použití rozrážečů (V-4, V-5 a V-6). Všechny ostatní varianty dávají vzniknout vodnímu skoku, jehož délka se výrazně neliší od prostého vodního skoku (V-1). Toto zjištění je v souladu s očekáváním.

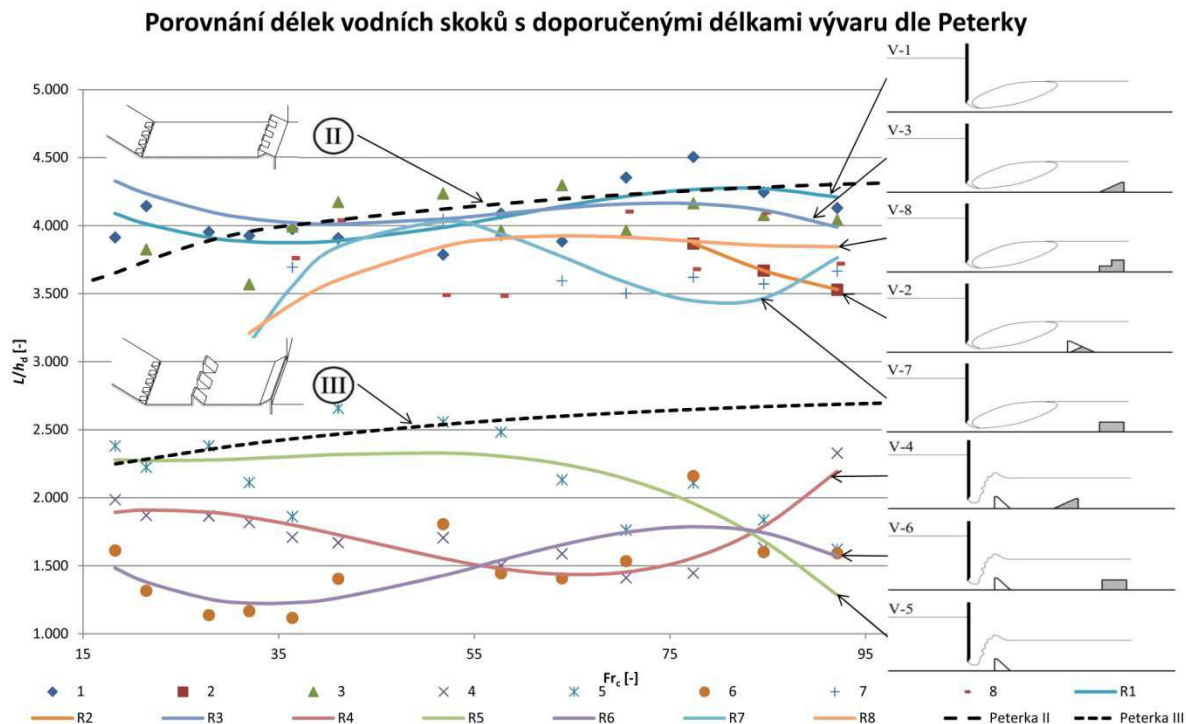
Graf také obsahuje teoretické délky vodního skoku podle Smetany (dle vztahu 5.2) a Pavlovského (dle vztahu 5.3). Z porovnání s variantou V-1 vychází jako přesnější vztah podle Pavlovského.

V oblasti $Fr_c = (30 \div 40)$ je u variant V-7 a V-8 délka vodního skoku kratší. Důvodem je vzduť vody závěrečným prahem a vytvoření prostého vodního skoku s druhou vzájemnou hloubkou rovnající se součtu výšky prahu a výšky přepadového paprsku nad ním. V těchto případech se za prahem vytvořil podružný vodní skok. Jedná se tak o porovnávání dvou kvalitativně odlišných stavů.

Pozn.: V grafu na obrázku 38 nejsou zakresleny stavy, při kterých nebyl dosažitelný přilehlý vodní skok.



Obr. 38 Graf závislosti poměru L/h_d na Fr_c



Obr. 39 Porovnání délek vodních skoků s doporučenými délkami vývaru dle Peterky

Graf na obrázku 39 znázorňuje shodu naměřených údajů s údaji o doporučených délkách typových vývarů podle Peterky. S výjimkou nejnižších hodnot průtoků u varianty V-3 lze konstatovat, že naměřené hodnoty délek vodních skoků ve variantách pouze se závěrečným prahem (V-2, V-3, V-7 a V-8) jsou nižší než doporučená délka Peterkova vývaru typu II. Analogicky u variant s dnovými rozrážecí (V-4, V-5 a V-6) jsou hodnoty délek vodních skoků nižší než doporučená délka Peterkova vývaru typu III.

Vyhodnocením Froudova kritéria proudu ve žlabu za vodním skokem (veličina Fr_d v příloze 1) jsem potvrdil, že se během pokusů vždy podařilo na odtoku z modelu dosáhnout říčního proudění.

7 ZÁVĚR

Práce se zabývala srovnáváním účinnosti jednotlivých dnových příčných prvků (prahů a rozrážečů) na základě zkoušek provedených na hydraulickém modelu. Na základě vyhodnocení výsledků experimentů byly zkoušené varianty a kombinace dnových prvků rozděleny do skupin s podobnou účinností tlumení energie.

Skupinu nejúčinnějších variant tvoří varianty s dnovými rozrážeči (V-4, V-5 a V-6). Rozdíly mezi zkoušenými variantami pouze s rozrážeči a variantami s rozrážeči a závěrečným prahem byly zanedbatelné. Z toho plyne, že největší vliv na tlumení energie měly při mnou zkoušených geometrických podmínkách dnové rozrážeče.

Citovaná literatura neuvádí účinnosti tlumení kinetické energie proudu $\Delta E/E_c$ pomocí dnových prvků a jejich kombinací, proto je mnou provedené zhodnocení této účinnosti přínosem této práce.

Práce neřeší konkrétní uspořádání vývarového prostoru. Je doporučitelné každý návrh vývaru s uvedenými tlumicími prvky ověřit modelovými zkouškami, což je v souladu se zněním norem pro navrhování přehrad a jezů. Z uvedených výsledků je možné při respektování zásad modelové podobnosti provést vhodný návrh např. dodatečné úpravy vývaru při rekonstrukci.

8 LITERATURA A POUŽITÉ PODKLADY

- [1] BROŽA, Vojtěch, Jiří KRATOCHVÍL, Pavel PETER a Ladislav VOTRUBA. *Přehrady*. Parha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] BOOR, Boris, KUNŠTÁTSKÝ Jiří a PATOČKA Cyril. *Hydraulika: pro vodohospodářské stavby*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968.
- [3] JANDORA, Jan a ŠULC Jan. *Hydraulika: Modul 01*. Brno, 2006.
- [4] GABRIEL, Pavel. *Jezy: celostátní vysokoškolská učebnice pro stavební fakulty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] Oprava hráze na Vranově začne příští rok. *Tisková zpráva Povodí Moravy, s.p.* [online]. 2014 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/oprava-hraze-na-vranove-zacne-pristi-rok/>
- [6] KRATOCHVÍL, Stanislav. *Vodní nádrže a přehrady*. Praha: Československá akademie věd, 1961. Dostupné také z: <http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:4d8ca760-c53c-11e3-aec3-005056827e52>
- [7] KNOFLÍČEK, Jakub. *Vliv příčných dnových prvků na tlumení energie proudu ve vývaru*. Brno, 2015. 85 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
- [8] ŠULC, Jan a ŽOUŽELA Michal. *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice*. Výzkumná zpráva, LVV-FAST-VUT v Brně, 2013.
- [9] ČÁBELKA, Jaroslav a Pavel GABRIEL. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. Díl 1., Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Praha: Academia, 1987. Dostupné také z: <http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:cbddab70-4178-11e3-9c86-005056827e51>
- [10] MÄSIAR, Ernest a Jozef KAMENSKÝ. *Hydraulika pre stavebných inžinierov*. [1.], Objekty a potrubia. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia stavebníckej literatúry.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Závislost hloubky na energii proudu	11
Obr. 2	Vodní skok s dnovým režimem – prostý a vlnovitý	13
Obr. 3	Varianta V-8 při $80 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, oddálený vodní skok	14
Obr. 4	Schéma parametrů vodního skoku.....	15
Obr. 5	Dvojice mohutných dnových rozrážečů (VD Vranov, Dyje)[5]	18
Obr. 6	Schéma Peterkova vývaru typu II s doporučenými rozměry.....	19
Obr. 7	Graf pro určení délky Peterkových vývarů typu II, III a IV	19
Obr. 8	Schéma Peterkova vývaru typu III s doporučenými rozměry	20
Obr. 9	Výška rozrážečů (1) a závěrečného prahu (2) Peterkova vývaru typu III.....	20
Obr. 10	Schéma Peterkova vývaru typu IV s doporučenými rozměry	21
Obr. 11	Rehbockův ozubený práh s doporučenými rozměry.....	22
Obr. 12	Rehbockův ozubený práh – model instalovaný ve zkušebním žlabu	23
Obr. 13	Ozubený práh vývaru s rozrážeči podle Smrčka	24
Obr. 14	Celkový protiproudň pohled na měrný žlab	27
Obr. 15	Detail profilu tvořícího ostrou hranu otvoru, V-2 poproudň pohled	28
Obr. 16	Varianta V-1	29
Obr. 17	Varianta V-2	30
Obr. 18	Varianta V-3	31
Obr. 19	Varianta V-4	32
Obr. 20	Varianta V-5	33

Obr. 21	Varianta V-6	34
Obr. 22	Varianta V-7	35
Obr. 23	Varianta V-8	36
Obr. 24	Plně otevřený žaluziový uzávěr na konci žlabu	37
Obr. 25	Dotykový displej řídicího systému ($75 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$)	38
Obr. 26	Displej pro odečet hloubky měřené ultrazvukovým čidlem	39
Obr. 27	Detail hrotového měřidla, vlevo ultrazvukový snímač hladiny	40
Obr. 28	Dnové rozrážeče (V-4, V-5, V-6)	43
Obr. 29	Závěrečný práh trojúhelníkového průřezu	43
Obr. 30	Závěrečný práh obdélníkového průřezu – protiproudň pohled.....	44
Obr. 31	Schodovitý závěrečný práh	44
Obr. 32	Znázornění nejvyššího výstupu hladiny h_{\max} (V-4, $80 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$).....	46
Obr. 33	Graf závislosti $\Delta E/E_c$ na Fr_c	49
Obr. 34	Graf závislosti $\Delta E/E_c$ na Fr_c – detail $Fr_c > 50$	51
Obr. 35	Účinnost úpravy na energii proudu	54
Obr. 36	Podružný vodní skok za závěrečným prahem (V-6, $60 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$)	55
Obr. 37	Účinnost úpravy na potřebnou velikost hloubky dolní vody	58
Obr. 38	Graf závislosti poměru L/h_d na Fr_c	59
Obr. 39	Porovnání délek vodních skoků s doporučenými délkami vývaru dle Peterky	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Seřazení variant podle míry disipace energie pro $Fr_c = 92$	52
Tab. 2	Seřazení variant podle míry disipace energie pro $Fr_c = 52$	53
Tab. 3	Porovnání účinnosti tlumení a nejvyšších výstupů hladiny pro $Fr_c = 92$	56
Tab. 4	Přehled h_{\max}/h_d pro varianty V-4, V-5 a V-6 pro průtoky $Q_m = (85 \div 120) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, $Fr \approx (41 \div 92)$	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

E	energie průřezu [m]
FAST	Fakulta stavební
Fr.....	Froudovo kritérium [-]
g	tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
h	hloubka proudu [m]
h_1	první vzájemná hloubka vodního skoku [m]
h_2	druhá vzájemná hloubka vodního skoku [m]
h_k	kritická hloubka [m]
h_s	výška vodního skoku [m]
i_k	kritický sklon [-]
Index 1	veličina v profilu začátku vodního skoku
Index 2	veličina v profilu konce vodního skoku
Index c	veličina v profilu kontrakce
Index d	veličina v profilu dolní vody
Index h	veličina v profilu horní vody
L	délka vodního skoku [m]
l	délkový rozměr [m]
M.....	index bystřinnosti [-]; měřítko modelové podobnosti
PID.....	proporcionální-integrační-derivační (regulátor)
Q	průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]; [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]
q	specifický průtok [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
Re.....	Reynoldsovo kritérium [-]
S	průřezová plocha [m^2]
v	průřezová rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

VDvodní dílo

V-nn-tá varianta modelu

VUTVysoké učení technické v Brně

α Coriolisovo kritérium [-]

Δ přírůstek, změna

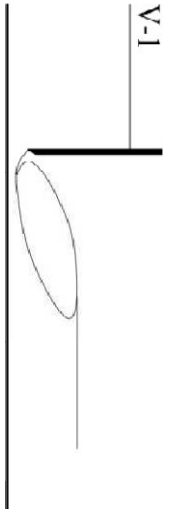
ν součinitel kinematické viskozity [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

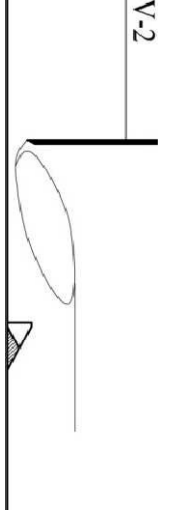
σ míra vzdutí [-]

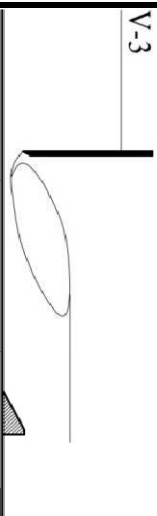
SEZNAM PŘÍLOH

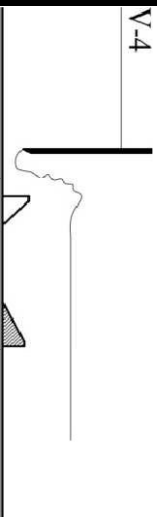
1. Průřezové charakteristiky jednotlivých zkoušených variant modelu

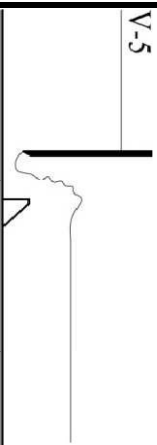
Příloha 1 Průřezové charakteristiky jednotlivých zkoušených variant modelu

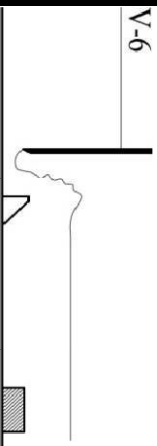
Varianța	[l·s ⁻¹]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
	<i>Q</i>	<i>h_h</i>	<i>S_h</i>	<i>v_h</i>	<i>Fr_h</i>	<i>h_c</i>	<i>S_c</i>	<i>v_c</i>	<i>Fr_c</i>	<i>h_d</i>	<i>h_{max}</i>	<i>S_d</i>	<i>v_d</i>	<i>Fr_d</i>	<i>E_h</i>	<i>E_c</i>	<i>E_d</i>	ΔE	$\Delta E / E_c$
	60	241	0.243	0.25	0.026	27	0.027	2.20	18.277	140		0.162	0.37	0.088	0.244	0.274	0.147	0.127	0.463
	65	283	0.286	0.23	0.019	27	0.027	2.38	21.450	152		0.174	0.37	0.083	0.286	0.317	0.159	0.157	0.497
	70	323	0.326	0.21	0.015	26	0.026	2.67	27.859	172		0.194	0.36	0.069	0.325	0.388	0.179	0.210	0.540
	75	365	0.369	0.20	0.012	26	0.026	2.86	31.981	191		0.213	0.35	0.060	0.367	0.442	0.197	0.244	0.553
	80	413	0.417	0.19	0.009	26	0.026	3.05	36.387	206		0.228	0.35	0.055	0.415	0.499	0.212	0.287	0.575
	85	462	0.467	0.18	0.007	26	0.026	3.24	41.078	220		0.242	0.35	0.052	0.464	0.560	0.226	0.334	0.596
	90	510	0.515	0.17	0.006	25	0.025	3.56	51.803	235		0.258	0.35	0.049	0.512	0.673	0.241	0.431	0.641
	95	577	0.583	0.16	0.005	25	0.025	3.76	57.719	247		0.270	0.35	0.047	0.578	0.746	0.253	0.493	0.661
	100	622	0.628	0.16	0.004	25	0.025	3.96	63.954	259		0.282	0.35	0.046	0.623	0.824	0.265	0.559	0.678
	105	680	0.687	0.15	0.004	25	0.025	4.16	70.509	271		0.294	0.36	0.045	0.681	0.906	0.278	0.629	0.694
	110	734	0.741	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	281		0.304	0.36	0.044	0.735	0.992	0.288	0.705	0.710
	115	775	0.783	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	292		0.315	0.36	0.044	0.776	1.082	0.299	0.783	0.724
	120	829	0.837	0.14	0.003	25	0.025	4.75	92.094	306		0.329	0.36	0.042	0.830	1.176	0.313	0.863	0.734

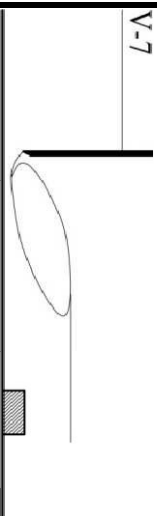
	60	289	0.292	0.21	0.015	27	0.027	2.20	18.277	153		0.175	0.34	0.069	0.291	0.274	0.159	0.115	0.419
	65	310	0.313	0.21	0.014	27	0.027	2.38	21.450	158		0.180	0.36	0.075	0.312	0.317	0.165	0.152	0.480
	70	358	0.362	0.19	0.011	26	0.026	2.67	27.859	175		0.197	0.36	0.066	0.360	0.388	0.181	0.207	0.533
	75	396	0.400	0.19	0.009	26	0.026	2.86	31.981	186		0.208	0.36	0.064	0.398	0.442	0.193	0.249	0.564
	80	439	0.443	0.18	0.008	26	0.026	3.05	36.387	196		0.218	0.37	0.063	0.441	0.499	0.203	0.296	0.594
	85	501	0.506	0.17	0.006	26	0.026	3.24	41.078	212		0.234	0.36	0.058	0.502	0.560	0.219	0.341	0.609
	90	548	0.553	0.16	0.005	25	0.025	3.56	51.803	223		0.245	0.37	0.056	0.549	0.673	0.230	0.443	0.658
	95	590	0.596	0.16	0.004	25	0.025	3.76	57.719	229		0.251	0.38	0.058	0.591	0.746	0.236	0.510	0.683
	100	645	0.651	0.15	0.004	25	0.025	3.96	63.954	244		0.267	0.38	0.054	0.646	0.824	0.251	0.573	0.695
	105	701	0.708	0.15	0.003	25	0.025	4.16	70.509	255		0.278	0.38	0.053	0.702	0.906	0.262	0.644	0.711
	110	752	0.760	0.14	0.003	25	0.025	4.36	77.384	260		0.283	0.39	0.055	0.753	0.992	0.268	0.725	0.730
	115	795	0.803	0.14	0.003	25	0.025	4.55	84.579	273		0.296	0.39	0.053	0.796	1.082	0.281	0.802	0.741
	120	836	0.844	0.14	0.002	25	0.025	4.75	92.094	287		0.310	0.39	0.050	0.837	1.176	0.295	0.882	0.749

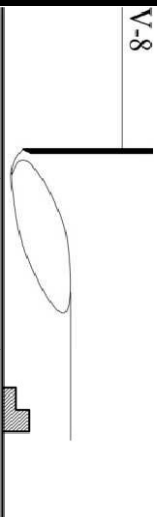
Varianta	[l·s ⁻¹]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
	Q	h_h	S_h	v_h	Fr_h	h_c	S_c	v_c	Fr_c	h_d	h_{max}	S_d	v_d	Fr_d	E_h	E_c	E_d	ΔE	$\Delta E / E_c$
<div> <div>V-3</div>  </div>	60	246	0.248	0.24	0.024	27	0.027	2.20	18.277	130		0.152	0.40	0.107	0.249	0.274	0.138	0.136	0.496
	65	288	0.291	0.22	0.018	27	0.027	2.38	21.450	150		0.172	0.38	0.086	0.291	0.317	0.157	0.159	0.503
	70	333	0.336	0.21	0.013	26	0.026	2.67	27.859	165		0.187	0.37	0.077	0.335	0.388	0.172	0.216	0.556
	75	377	0.381	0.20	0.010	26	0.026	2.86	31.981	179		0.201	0.37	0.071	0.379	0.442	0.186	0.256	0.579
	80	425	0.429	0.19	0.008	26	0.026	3.05	36.387	194		0.216	0.37	0.065	0.427	0.499	0.201	0.298	0.597
	85	472	0.477	0.18	0.007	26	0.026	3.24	41.078	206		0.228	0.37	0.063	0.474	0.560	0.213	0.347	0.620
	90	523	0.528	0.17	0.006	25	0.025	3.56	51.803	219		0.241	0.37	0.059	0.524	0.673	0.226	0.446	0.664
	95	572	0.578	0.16	0.005	25	0.025	3.76	57.719	228		0.250	0.38	0.059	0.573	0.746	0.235	0.511	0.685
	100	645	0.651	0.15	0.004	25	0.025	3.96	63.954	245		0.268	0.37	0.054	0.646	0.824	0.252	0.572	0.694
	105	690	0.697	0.15	0.003	25	0.025	4.16	70.509	256		0.279	0.38	0.052	0.691	0.906	0.263	0.643	0.710
	110	736	0.743	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	266		0.289	0.38	0.052	0.737	0.992	0.273	0.719	0.724
	115	795	0.803	0.14	0.003	25	0.025	4.55	84.579	279		0.302	0.38	0.049	0.796	1.082	0.286	0.796	0.735
	120	850	0.859	0.14	0.002	25	0.025	4.75	92.094	289		0.312	0.38	0.049	0.851	1.176	0.297	0.880	0.748

<div> <div>V-4</div>  </div>	60	300	0.303	0.20	0.013	27	0.027	2.20	18.277	148		0.170	0.35	0.076	0.302	0.274	0.154	0.119	0.436
	65	337	0.340	0.19	0.011	27	0.027	2.38	21.450	156		0.178	0.37	0.077	0.339	0.317	0.163	0.154	0.486
	70	370	0.374	0.19	0.010	26	0.026	2.67	27.859	159		0.181	0.39	0.085	0.372	0.388	0.167	0.222	0.571
	75	409	0.413	0.18	0.008	26	0.026	2.86	31.981	172		0.194	0.39	0.079	0.411	0.442	0.180	0.262	0.593
	80	448	0.452	0.18	0.007	26	0.026	3.05	36.387	176		0.198	0.40	0.085	0.450	0.499	0.184	0.315	0.631
	85	485	0.490	0.17	0.006	26	0.026	3.24	41.078	179	290	0.201	0.42	0.092	0.487	0.560	0.188	0.372	0.664
	90	515	0.520	0.17	0.006	25	0.025	3.56	51.803	184	285	0.206	0.44	0.095	0.517	0.673	0.194	0.479	0.712
	95	568	0.574	0.17	0.005	25	0.025	3.76	57.719	191	305	0.213	0.45	0.096	0.569	0.746	0.201	0.545	0.731
	100	598	0.604	0.17	0.005	25	0.025	3.96	63.954	197	330	0.219	0.46	0.098	0.599	0.824	0.208	0.617	0.748
	105	672	0.679	0.15	0.004	25	0.025	4.16	70.509	211	340	0.233	0.45	0.089	0.673	0.906	0.221	0.685	0.756
	110	725	0.732	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	224	360	0.246	0.45	0.083	0.726	0.992	0.234	0.758	0.764
	115	770	0.778	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	226	395	0.248	0.46	0.089	0.771	1.082	0.237	0.845	0.781
	120	826	0.834	0.14	0.003	25	0.025	4.75	92.094	237	485	0.260	0.46	0.085	0.827	1.176	0.248	0.928	0.789

Varianta	[l·s ⁻¹]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
	Q	h_h	S_h	v_h	Fr_h	h_c	S_c	v_c	Fr_c	h_d	h_{max}	S_d	v_d	Fr_d	E_h	E_c	E_d	ΔE	$\Delta E / E_c$
<div>V-5</div> 	60	239	0.241	0.25	0.026	27	0.027	2.20	18.277	110	205	0.131	0.46	0.164	0.242	0.274	0.121	0.153	0.559
	65	272	0.275	0.24	0.021	27	0.027	2.38	21.450	116	225	0.137	0.47	0.168	0.275	0.317	0.127	0.189	0.598
	70	307	0.310	0.23	0.017	26	0.026	2.67	27.859	131	250	0.153	0.46	0.142	0.310	0.388	0.142	0.246	0.635
	75	346	0.349	0.21	0.014	26	0.026	2.86	31.981	142	270	0.164	0.46	0.132	0.348	0.442	0.153	0.289	0.654
	80	387	0.391	0.20	0.011	26	0.026	3.05	36.387	152	315	0.174	0.46	0.126	0.389	0.499	0.163	0.336	0.674
	85	431	0.435	0.20	0.009	26	0.026	3.24	41.078	161	355	0.183	0.46	0.122	0.433	0.560	0.172	0.388	0.693
	90	480	0.485	0.19	0.007	25	0.025	3.56	51.803	172	350	0.194	0.46	0.114	0.482	0.673	0.183	0.490	0.728
	95	532	0.537	0.18	0.006	25	0.025	3.76	57.719	182	370	0.204	0.47	0.109	0.534	0.746	0.193	0.553	0.741
	100	595	0.601	0.17	0.005	25	0.025	3.96	63.954	196	350	0.218	0.46	0.099	0.596	0.824	0.207	0.618	0.749
	105	645	0.651	0.16	0.004	25	0.025	4.16	70.509	202	370	0.224	0.47	0.101	0.646	0.906	0.213	0.693	0.765
	110	699	0.706	0.16	0.004	25	0.025	4.36	77.384	211	395	0.233	0.47	0.098	0.700	0.992	0.222	0.770	0.776
	115	755	0.763	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	222	390	0.244	0.47	0.093	0.756	1.082	0.233	0.849	0.784
	120	808	0.816	0.15	0.003	25	0.025	4.75	92.094	230	420	0.253	0.48	0.092	0.809	1.176	0.242	0.935	0.795

<div>V-6</div> 	60	309	0.312	0.19	0.012	27	0.027	2.20	18.277	150		0.172	0.35	0.073	0.311	0.274	0.156	0.118	0.429
	65	352	0.356	0.18	0.010	27	0.027	2.38	21.450	161		0.183	0.36	0.071	0.354	0.317	0.167	0.149	0.471
	70	397	0.401	0.17	0.008	26	0.026	2.67	27.859	174		0.196	0.36	0.067	0.399	0.388	0.181	0.208	0.535
	75	431	0.435	0.17	0.007	26	0.026	2.86	31.981	179		0.201	0.37	0.071	0.433	0.442	0.186	0.256	0.579
	80	469	0.474	0.17	0.006	26	0.026	3.05	36.387	187		0.209	0.38	0.072	0.470	0.499	0.194	0.305	0.610
	85	510	0.515	0.17	0.005	26	0.026	3.24	41.078	190	280	0.212	0.40	0.078	0.511	0.560	0.198	0.362	0.646
	90	546	0.551	0.16	0.005	25	0.025	3.56	51.803	197	280	0.219	0.41	0.079	0.547	0.673	0.206	0.467	0.694
	95	586	0.592	0.16	0.004	25	0.025	3.76	57.719	200	290	0.222	0.43	0.085	0.587	0.746	0.209	0.537	0.720
	100	636	0.642	0.16	0.004	25	0.025	3.96	63.954	208	310	0.230	0.43	0.084	0.637	0.824	0.218	0.607	0.736
	105	670	0.677	0.16	0.004	25	0.025	4.16	70.509	213	335	0.235	0.45	0.087	0.671	0.906	0.223	0.683	0.754
	110	720	0.727	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	218	365	0.240	0.46	0.090	0.721	0.992	0.229	0.764	0.770
	115	772	0.780	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	226	370	0.248	0.46	0.089	0.773	1.082	0.237	0.845	0.781
	120	820	0.828	0.14	0.003	25	0.025	4.75	92.094	233	405	0.256	0.47	0.089	0.821	1.176	0.244	0.932	0.792

Varianta	[l·s ⁻¹]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[mm]	[mm]	[m ²]	[m·s ⁻¹]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
	Q	h_h	S_h	v_h	Fr_h	h_c	S_c	v_c	Fr_c	h_d	h_{max}	S_d	v_d	Fr_d	E_h	E_c	E_d	ΔE	$\Delta E/E_c$
<div> <div>V-7</div>  </div>	60	274	0.277	0.22	0.017	27	0.027	2.20	18.277	144		0.166	0.36	0.082	0.276	0.274	0.151	0.123	0.450
	65	302	0.305	0.21	0.015	27	0.027	2.38	21.450	154		0.176	0.37	0.080	0.304	0.317	0.161	0.156	0.492
	70	330	0.333	0.21	0.014	26	0.026	2.67	27.859	164		0.186	0.38	0.079	0.332	0.388	0.171	0.217	0.559
	75	366	0.370	0.20	0.011	26	0.026	2.86	31.981	175		0.197	0.38	0.076	0.368	0.442	0.182	0.259	0.587
	80	407	0.411	0.19	0.009	26	0.026	3.05	36.387	187		0.209	0.38	0.072	0.409	0.499	0.194	0.305	0.610
	85	463	0.468	0.18	0.007	26	0.026	3.24	41.078	202		0.224	0.38	0.066	0.465	0.560	0.209	0.351	0.626
	90	505	0.510	0.18	0.006	25	0.025	3.56	51.803	212		0.234	0.38	0.065	0.507	0.673	0.220	0.453	0.674
	95	570	0.576	0.17	0.005	25	0.025	3.76	57.719	226		0.248	0.38	0.061	0.571	0.746	0.233	0.513	0.687
	100	615	0.621	0.16	0.004	25	0.025	3.96	63.954	237		0.260	0.39	0.059	0.616	0.824	0.245	0.580	0.703
	105	670	0.677	0.16	0.004	25	0.025	4.16	70.509	248		0.271	0.39	0.057	0.671	0.906	0.256	0.651	0.718
	110	711	0.718	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	256		0.279	0.39	0.058	0.712	0.992	0.264	0.728	0.734
	115	780	0.788	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	276		0.299	0.38	0.051	0.781	1.082	0.284	0.799	0.738
	120	832	0.840	0.14	0.002	25	0.025	4.75	92.094	282		0.305	0.39	0.052	0.833	1.176	0.290	0.886	0.754

<div> <div>V-8</div>  </div>	60	288	0.291	0.21	0.015	27	0.027	2.20	18.277	152		0.174	0.35	0.071	0.290	0.274	0.158	0.116	0.423
	65	323	0.326	0.20	0.013	27	0.027	2.38	21.450	164		0.186	0.35	0.068	0.325	0.317	0.170	0.146	0.462
	70	357	0.361	0.19	0.011	26	0.026	2.67	27.859	173		0.195	0.36	0.068	0.359	0.388	0.180	0.209	0.537
	75	398	0.402	0.19	0.009	26	0.026	2.86	31.981	186		0.208	0.36	0.064	0.400	0.442	0.193	0.249	0.564
	80	422	0.426	0.19	0.009	26	0.026	3.05	36.387	189		0.211	0.38	0.070	0.424	0.499	0.196	0.303	0.607
	85	465	0.470	0.18	0.007	26	0.026	3.24	41.078	199		0.221	0.38	0.069	0.467	0.560	0.207	0.353	0.631
	90	511	0.516	0.17	0.006	25	0.025	3.56	51.803	214		0.236	0.38	0.063	0.513	0.673	0.221	0.451	0.671
	95	564	0.570	0.17	0.005	25	0.025	3.76	57.719	223		0.245	0.39	0.063	0.565	0.746	0.231	0.516	0.691
	100	611	0.617	0.16	0.004	25	0.025	3.96	63.954	238		0.261	0.38	0.058	0.612	0.824	0.246	0.579	0.702
	105	670	0.677	0.16	0.004	25	0.025	4.16	70.509	249		0.272	0.39	0.057	0.671	0.906	0.257	0.650	0.717
	110	720	0.727	0.15	0.003	25	0.025	4.36	77.384	260		0.283	0.39	0.055	0.721	0.992	0.268	0.725	0.730
	115	775	0.783	0.15	0.003	25	0.025	4.55	84.579	276		0.299	0.38	0.051	0.776	1.082	0.284	0.799	0.738
	120	840	0.848	0.14	0.002	25	0.025	4.75	92.094	287		0.310	0.39	0.050	0.841	1.176	0.295	0.882	0.749